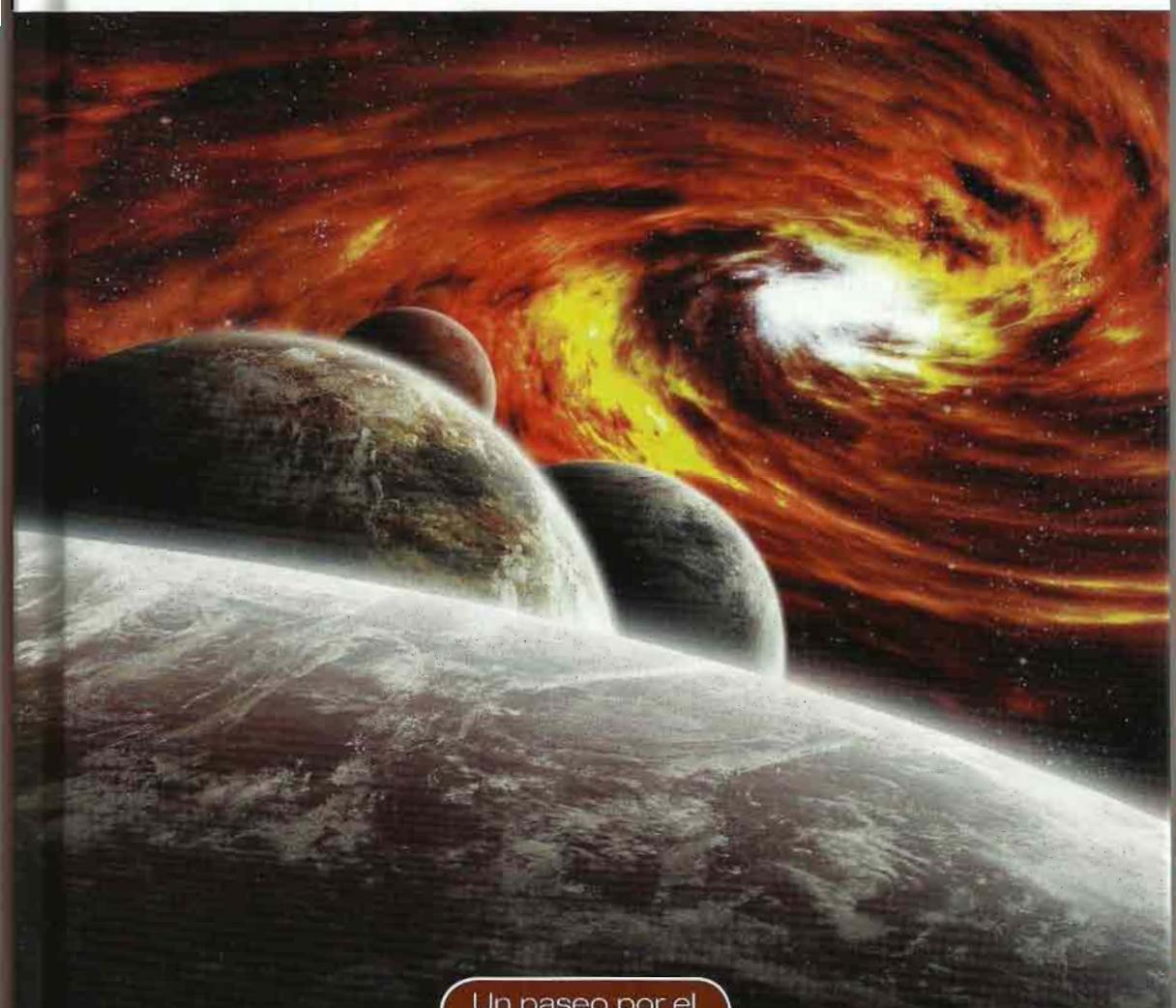


El final del universo

¿Qué destino le espera
al cosmos?



Un paseo por el
COSMOS



The Doctor y La Comunidad

Redigiralización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmoreau.blogspot.com/>

El final del universo

¿Qué destino le espera
al cosmos?

RBA

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7	
CAPÍTULO 1	Cómo es el universo	15
CAPÍTULO 2	Naturaleza y evolución de las galaxias	45
CAPÍTULO 3	La vida de las estrellas	69
CAPÍTULO 4	El ocaso cósmico	93
CAPÍTULO 5	El futuro del universo	115
CAPÍTULO 6	El universo habitable	141
LECTURAS RECOMENDADAS		163
ÍNDICE		165

INTRODUCCIÓN

Los que vivimos en una sociedad técnicamente avanzada hemos llegado a asociar la observación del universo con grandes telescopios terrestres y en órbita y sondas espaciales. Sin embargo, para asomarnos a él nos basta con nuestros ojos y encontrar una zona razonablemente alejada de cualquier contaminación lumínica, algo que por desgracia cada vez es más difícil. Hasta la invención del telescopio en el siglo XVII este fue el único procedimiento disponible para aquellos interesados en el cielo. Cuando se observa este a simple vista, el universo parece algo inmutable. Es cierto que se producen cambios: el día y la noche, las estaciones del año, las fases de la Luna o, para los más observadores, el movimiento de los planetas sobre un fondo de estrellas que durante muchísimo tiempo se consideraron fijas. Pero estos cambios son cíclicos y el patrón de cada uno parece estar fijado: los días, años, fases de la Luna y órbitas de los planetas se repiten en cada caso con un periodo que no parece cambiar con el tiempo si no se usan aparatos de medida con la precisión suficiente. La velocidad con la que la Tierra gira sobre sí misma con respecto a las estrellas cambia ligerísimamente de una jornada a otra debido a los cambios en la distribución de las masas de agua de los océanos

y la atmósfera. Estos cambios se superponen a las variaciones debidas a causas astronómicas, y no fue posible medirlos hasta la aparición de los relojes atómicos en el siglo xx. Por eso resulta sorprendente que muchas culturas humanas hayan considerado que el universo tuvo un origen y tendrá un final, aunque la explicación de ambos siempre ha tenido que ver más con la religión que con la ciencia. Y es que la ciencia poco ha podido decir sobre estos asuntos hasta que se ha contado con aparatos que nos han permitido superar las limitaciones de nuestra visión para ver más lejos, con más detalle y en otros tipos de radiación electromagnética que nuestros ojos no pueden captar, y también hacernos una idea de las distancias que nos separan de las estrellas y otros objetos astronómicos.

La determinación de la distancia es uno de los problemas centrales de la astronomía y de él han dependido a lo largo de la historia de esta ciencia las hipótesis que se han hecho sobre el origen y el destino futuro del universo. Conforme ha aumentado el refinamiento de los aparatos de observación disponibles ha ido creciendo el tamaño que se ha considerado que tiene el universo, y cada aumento en sus dimensiones ha requerido cambios en las explicaciones sobre cómo se formó y su evolución futura. El primer salto cualitativo en la observación del universo fue la aparición del telescopio. Las observaciones de Galileo en el siglo xvii dieron el espaldarazo definitivo al modelo heliocéntrico del sistema solar. Pero con los medios técnicos de aquella época solo era posible medir la distancia entre la Tierra y el Sol con una precisión muy pobre. La distancia entre ambos es la clave para medir el tamaño del sistema solar, ya que conocido el radio de la órbita de la Tierra se pueden calcular las de los demás planetas a partir de sus períodos orbitales. La distancia entre la Tierra y el Sol es también la base de la determinación de distancias a las estrellas más cercanas. Hasta el siglo xviii no se pudieron conocer con seguridad las dimensiones del sistema solar y la distancia a las estrellas seguía siendo una cuestión por resolver. La ignorancia sobre todos los cuerpos más alejados que los planetas conocidos quizás fue lo que hizo que los pensadores de esa época se preocuparan por explicar el origen del sistema solar, obviando el resto

de las estrellas. Así, el primer modelo «serio» sobre la formación del sistema solar lo propusieron el filósofo Immanuel Kant y el matemático, físico y astrónomo Pierre-Simon de Laplace, quienes en el siglo XVIII sugirieron que el Sol y los planetas habían surgido de la contracción de una nube de gas en rotación. Esta misma idea, que ahora sabemos que esencialmente es correcta, podía servir para explicar la formación de las estrellas si se admite que son similares al Sol. En cuanto al universo, para muchos de los pensadores de esta época no era más que una colección de estrellas que existía desde siempre y que existiría para siempre.

Esta visión cambió un poco en el siglo XIX con la aparición de una nueva técnica de análisis químico: el del espectro de la luz. Observando la que nos llega del Sol y de otras estrellas se pudo probar definitivamente que son esferas de gas muy caliente. Una vez bien conocida la naturaleza de las estrellas, la termodinámica, una nueva rama de la física aparecida también en el siglo XIX que estudia los intercambios de calor entre cuerpos y el efecto que tiene este sobre la materia, encontró un argumento que permitió hacer la primera predicción sobre el fin del universo: dado que todo cuerpo caliente tiende a enfriarse, las estrellas durarían tanto tiempo como el que tardarían en dejar de brillar. Una vez que estas se apagaran, el universo tendría una «muerte térmica», en la que se iría enfriando poco a poco, de modo que todas las estrellas apagadas y los planetas que quizás giraran en torno a ellas se irían enfriando lentamente hasta alcanzar el *cero absoluto* (-273 °C). El problema es que para calcular el tiempo que una estrella tarda en enfriarse hay que conocer en primer lugar cuál es la fuente de calor que la ha calentado. En la segunda mitad del siglo XIX, los físicos Hermann von Helmholtz y lord Kelvin propusieron como fuente de calor la liberación de energía gravitatoria conforme el gas de una estrella se contrae sobre sí mismo.

La idea de Helmholtz y Kelvin se basa en el hecho de que todo cuerpo en el seno de un campo gravitatorio tiene una energía potencial. Cuando un cuerpo cae en uno de ellos esta energía potencial se transforma en energía cinética, que es lo que le ocurre, por ejemplo, a una pelota que se deja caer desde una cierta altura. Cada molécula del gas de una estrella se encuentra en el

campo gravitatorio creado por todas las demás moléculas de la estrella. Si esta se contrae por la acción de su propia gravedad, las moléculas de gas ganan energía cinética a costa de su energía potencial gravitatoria, ya que las moléculas «caen» dentro del campo gravitatorio de la estrella. Pero las moléculas de un gas están chocando continuamente unas con otras. Al chocar dos moléculas, las direcciones en las que se mueven cambian al azar, como los coches de choque en una atracción de feria. De este modo el movimiento en dirección radial de las moléculas al contraerse la estrella se desordena. Pero el movimiento desordenado de las moléculas de un gas no es otra cosa que calor, lo que significa que en última instancia parte de la energía gravitatoria de la estrella se ha convertido en calor.

Cuando lord Kelvin hizo cuentas basándose en este razonamiento encontró que el Sol podía mantener su temperatura superficial y su brillo durante unos cuantos millones de años. Un millón de años es un tiempo enorme comparado con toda la historia escrita de la humanidad, así que su argumento parecía convincente. Sin embargo, por esa época los geólogos ya habían llegado a la conclusión de que la Tierra tenía centenares o miles de millones de años de antigüedad, así que tenía que haber un mecanismo diferente capaz de mantener al Sol y las estrellas calientes durante un tiempo del orden de miles de millones de años: de otro modo, la Tierra sería más antigua que el Sol, algo que a los científicos del siglo XIX ya les parecía poco creíble. Esta paradoja no quedó resuelta hasta que los avances en el conocimiento de la estructura de la materia a escala subatómica en la primera mitad del siglo XX permitieron al astrofísico estadounidense Hans Bethe, en 1938, demostrar teóricamente que la naturaleza de la fuente de energía que hace brillar las estrellas es la fusión de los núcleos de elementos químicos ligeros, una idea propuesta por el astrofísico británico Arthur Eddington en 1926. Los estudios teóricos posteriores encontraron que la fusión nuclear permite a algunas estrellas brillar durante miles de millones de años, lo que aumentó el rango temporal de la evolución del universo de millones de años a miles de millones de años.

Volviendo al siglo xix, el refinamiento de la astrometría (la parte de la astronomía dedicada a medir las posiciones de los objetos celestes) permitió medir de forma rigurosa las distancias a las estrellas. Esto posibilitó empezar a investigar cuál era el tamaño y la forma del universo. Ya en la segunda mitad del siglo xviii, el astrónomo William Herschel, a partir de los primeros catálogos de posiciones de estrellas, sugirió la idea de que nuestro Sol está contenido en una agrupación de estrellas, que ahora conocemos como la Vía Láctea, de forma más o menos discoidal. En aquella época la mayoría de los astrónomos pensaban que el universo se limitaba a la Vía Láctea, así que, explicando la formación y el futuro de esta se explicaría la evolución del universo. Sin embargo, era conocido que la Vía Láctea no solo contiene estrellas, sino también lo que parecían ser condensaciones de gas que recibieron el nombre de «nebulosas». Entre las nebulosas, algunas tenían una forma lenticular similar a la que ya se sabía que posee nuestra galaxia, así que Herschel propuso que se trataba de galaxias iguales a la Vía Láctea, las cuales se encontraban a distancias fantásticamente grandes. La controversia entre los que proponían que el universo contiene una multitud de galaxias y aquellos que defendían que la nuestra era todo lo que había en él duró un tiempo, hasta que en 1923 el astrónomo estadounidense Edwin Hubble fue capaz de determinar la distancia a la galaxia de Andrómeda, y aunque encontró un resultado menor que el que ahora se acepta como correcto, era no obstante bastante mayor que el tamaño de nuestra propia galaxia. De esta forma quedó probado de forma definitiva que el universo contiene un número enorme de galaxias, lo que hizo aumentar extraordinariamente el tamaño del universo conocido.

Por estas fechas, Albert Einstein había completado su teoría de la relatividad general. En un principio, Einstein concibió esta teoría como una descripción matemática de la gravedad que fuera coherente con la relatividad especial, que describe cómo se relacionan entre sí las medidas del mismo fenómeno físico que hacen varios observadores que se mueven uno con respecto a otro. Las ecuaciones de la relatividad especial mezclan los conceptos de espacio y tiempo: lo que para un obser-

vador puede ser una diferencia temporal, para otro puede ser una distancia. En la descripción relativista de la gravedad, esta queda reducida al efecto que todo cuerpo con masa produce en el espacio y en el tiempo en sus proximidades. Al combinar en un mismo conjunto de ecuaciones el espacio, el tiempo y la masa, las de la relatividad general pueden usarse para describir la evolución del universo. El propio Einstein fue el primero en aplicar sus ecuaciones para saber el futuro del universo y para su sorpresa encontró que predecían que debería expandirse o contraerse con el paso del tiempo, dependiendo de su densidad actual. Si la densidad del universo es menor que cierto valor conocido como *densidad crítica*, el universo se expandirá indefinidamente, mientras que si la densidad es mayor que la crítica, la atracción gravitatoria entre diferentes regiones del universo acabará frenando la expansión para convertirla en un colapso gravitatorio del universo sobre sí mismo en un futuro lejano. Influido por la idea de que el universo era eterno e inmutable, Einstein incluyó en sus ecuaciones un término conocido como *constante cosmológica* para que fuera posible una solución en la que el universo no se expandiera ni se contrajera. Sin embargo, poco después de que Einstein publicara sus resultados, Edwin Hubble demostró que la inmensa mayoría de las galaxias se alejan de nosotros, lo que prueba que el universo se encuentra en expansión.

Desde el descubrimiento de Hubble, buena parte de los estudios sobre el futuro del universo se han centrado en determinar si la densidad del universo es mayor o menor que la crítica. La tarea no es sencilla, ya que la equivalencia entre masa y energía propuesta por el propio Einstein hace que no solo haya que contar la materia existente en el universo a la hora de determinar la densidad, sino también todas las formas de energía que se encuentran en él. Para hacer las cosas más difíciles, durante la segunda mitad del siglo xx se hizo cada vez más evidente que la mayor parte de la materia que existe en el universo no es visible para nosotros y que su naturaleza nos es desconocida: los astrónomos la llaman *materia oscura*. Más aún, a finales del siglo xx se descubrió que la expansión del

universo no se frena por la acción de la gravedad, antes bien, se está acelerando. Para explicar la aceleración de la expansión del universo es necesario suponer que existe una forma de energía de la que tampoco conocemos apenas nada, por lo que se ha dado en llamar *energía oscura*.

Conocidas las densidades de materia, energía, materia oscura y energía oscura, es posible sustituir las correspondientes variables en las ecuaciones de la relatividad general y hacer predicciones sobre el futuro del universo. Sin embargo, estas ecuaciones solo describen la evolución del universo a gran escala, sin entrar en los detalles de qué será de los elementos que lo componen: galaxias, estrellas o seres vivos. Como quiera que, sea cual sea el rango temporal en el que pueda existir cada uno de ellos, este debe ser menor que la duración del propio universo, en este libro empezaremos comentando cuánto tiempo pueden durar los distintos componentes del universo antes de hablar sobre qué nos dice la relatividad general en relación con el futuro del universo en su conjunto.

¿Cómo es el universo?

La humanidad ha avanzado más en el conocimiento de la estructura y composición del universo durante el pasado siglo xx que en toda su historia anterior. Mucho de ese conocimiento forma ya parte de la cultura general; aun así, todo lo que sabemos de él requiere un estudio más pormenorizado antes de conjeturar sobre su futuro.

Hay dos cosas sobre el universo sobre las que parece haber acuerdo: que es muy antiguo y que es muy grande. Sin embargo, dar valores numéricos a ambos conceptos es un poco más complicado. En cuanto a su edad, los astrónomos le atribuyen en la actualidad unos 13 800 millones de años ($13,8 \cdot 10^9$ años). Este valor procede de mediciones bastante recientes de la *anisotropía del fondo cósmico de microondas* hechas por las sondas WMAP de la NASA y Planck de la ESA (Agencia Espacial Europea). El fondo cósmico de microondas es la luz que ha estado viajando por el universo desde la época en la cual este se expandió y enfrío lo suficiente como para ser transparente a la luz. A partir de las irregularidades en el fondo cósmico de microondas es posible calcular las densidades de los distintos componentes del universo (materia ordinaria, materia oscura y energía oscura) y a partir de los valores de esas densidades, calcular su edad. En cuanto al tamaño del universo, como veremos lo más apropiado es decir que ese dato nos es desconocido. Haciendo una cuenta ingenua, el hecho de que tenga una edad finita y de que la velocidad de la luz ($299\,792\,458 \approx 3 \cdot 10^8$ m/s) sea la mayor velocidad posible, podría hacernos pensar que el radio del universo viene

dado por multiplicar la velocidad de la luz por su edad, o lo que es lo mismo, $13,8 \cdot 10^9$ años-luz. A la distancia calculada de esta forma se le suele llamar *radio del horizonte*. Sin embargo, si identificáramos el radio del horizonte con el tamaño del universo pasaríamos por alto dos hechos: el primero es que este se encuentra en expansión, y el segundo es que ha de ser homogéneo e isótropo. Que el universo sea homogéneo significa que todos los lugares en él tienen que ser equivalentes y que las leyes físicas deben ser las mismas en todos ellos. Que sea isótropo significa que tiene que tener el mismo aspecto independientemente de la dirección en la que lo observemos.

LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

El descubrimiento de la expansión del universo se debe al astrónomo estadounidense Edwin Hubble. En pocas palabras, Hubble encontró que las galaxias lejanas parecen alejarse de nosotros y que la velocidad v de alejamiento de una galaxia es proporcional a la distancia d que nos separa de ella:

$$v = Hd.$$

A esta fórmula se la conoce como *ley de Hubble* y la constante de proporcionalidad H recibe el nombre de *constante de Hubble*. Los astrónomos no están del todo de acuerdo con el valor de dicha constante: dependiendo del procedimiento de medida se obtienen valores situados entre 65 y 75 km/s/Mpc. Para usar números redondos emplearemos aquí un valor de 70 km/s/Mpc. Mpc significa megapársec, es decir un millón de pársec. El pársec es una unidad de distancia utilizada en astronomía que equivale aproximadamente a $3,08 \cdot 10^{16}$ m, o 3,26 años-luz. Esto significa que una galaxia que esté alejada de nosotros 3,26 millones de años-luz ($3,08 \cdot 10^{22}$ m) se aleja de nosotros a una velocidad de 70 km/s, o lo que es lo mismo, 70 000 m/s. La ley de Hubble nos

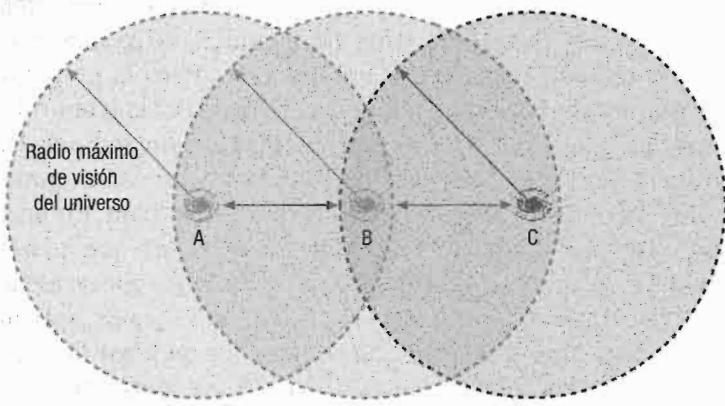
permite estimar la edad del universo: siguiendo con los números del ejemplo anterior, podemos calcular el tiempo que la galaxia en cuestión tardaría en recorrer los $3,08 \cdot 10^{22}$ metros que la separan de nosotros a la velocidad de 70 000 m/s. El resultado (dividiendo distancia entre velocidad) son $4,4 \cdot 10^{17}$ segundos, que equivalen a 13 900 millones de años. Podemos hacer las mismas cuentas para otras galaxias situadas a distancias diferentes y obtendremos el mismo resultado para el tiempo. Y si, por poner un caso, repetimos tales cuentas para una galaxia más lejana que la del ejemplo, esta nueva galaxia se alejará de nosotros a más velocidad y tardaría el mismo tiempo en cubrir la distancia a la que se encuentra en la actualidad. El hecho de que la ley de Hubble nos diga que todas las galaxias tardarían el mismo tiempo en alcanzar sus posiciones en la actualidad nos dice que hace 13 900 millones de años todas las galaxias se encontraban juntas, o lo que es lo mismo, que desde el origen del universo en el Big Bang han transcurrido 13 900 millones de años. Este tiempo no coincide exactamente con la edad del universo que hemos mencionado antes porque hemos supuesto que la velocidad a la que las galaxias se alejan de nosotros de acuerdo con la ley de Hubble no ha cambiado con el tiempo, cosa que no es cierta. Por ejemplo, en los cálculos que hemos hecho no hemos tenido en cuenta que las galaxias ejercen unas sobre otras una atracción gravitatoria que tiende a ralentizar la velocidad con la que se separan. Cuando este y otros factores se tienen presentes, el cálculo arroja el valor de 13 800 millones de años mencionado al principio del capítulo.

Si meditamos un poco sobre la ley de Hubble veremos que predice algo que a primera vista parece incongruente: si la distancia d entre nosotros y una galaxia lejana (llamémosla galaxia A) es lo suficientemente grande, la velocidad v a la que esa galaxia se aleja de nosotros se hace igual (o incluso mayor) que la velocidad de la luz. A la distancia para la cual la ley de Hubble predice que $v=c$ se la llama *radio de Hubble*. Para $H=70$ km/s/Mpc, el radio de Hubble vale $R_H=c/H=14\,000$ millones de años-luz. Por tanto, el valor numérico del radio del horizonte del que hablamos coincide aproximadamente con el valor numérico del

radio de Hubble del universo; en realidad, ambos son conceptos diferentes cuyos valores numéricos no tendrían por qué coincidir. Por qué ambos valores son aproximadamente iguales es otra de las cosas que no sabemos del universo. Pero la pregunta a contestar es: ¿es el radio de Hubble el tamaño del universo? O en otras palabras: ¿hay entonces galaxias más allá del radio de Hubble? La respuesta que tenemos que dar a esta última pregunta es afirmativa, por las razones que se dan a continuación. En primer lugar, al aplicar la ley de Hubble hemos supuesto que nosotros estamos en reposo y que es el resto de galaxias el que se aleja de nosotros. Mantener que la ley de Hubble solo puede aplicarse de esta forma implica admitir que ocupamos un lugar privilegiado en el universo, una afirmación que va en contra del principio mucho más razonable de que todos los lugares del universo tienen que ser equivalentes y que las leyes físicas deben ser las mismas en todo él. Por tanto, la ley de Hubble debe aplicarse por igual a todas las galaxias, por ejemplo, para una galaxia B que se encuentre a medio camino entre nosotros (galaxia C) y la galaxia A. Si el observador en la galaxia B y nosotros somos equivalentes, es razonable suponer que el observador en la galaxia B puede observar otras galaxias hasta una distancia igual al radio de Hubble desde su posición (figura 1). Aunque para nosotros es imposible ver a la galaxia A porque está fuera del universo visible desde nuestra perspectiva, un observador en la galaxia B sí puede ver a la galaxia A, ya que esta se halla dentro del radio de Hubble del observador en B. Además, algunas de esas galaxias estarán tan distantes de la nuestra que la velocidad a la que se alejan de nosotros será mayor que la velocidad de la luz y por tanto la luz que salga de ellas en este momento nunca nos alcanzará.

Con esta conclusión nos encontramos con una aparente contradicción: si la velocidad de la luz es la mayor velocidad posible, ¿cómo pueden algunas galaxias alejarse de nosotros a una velocidad mayor que la de la luz? La respuesta es que la velocidad v que aparece en la constante de Hubble se debe a la expansión del espacio que media entre una galaxia y nosotros y no al movimiento de una galaxia con respecto a su entorno. Para aclarar

FIG. 1



Versión simplificada de radios de Hubble alrededor de algunas galaxias, en una época determinada de la expansión del universo. Suponiendo que todas ellas se han formado lo bastante temprano, desde la galaxia A se avista la B y viceversa, ya que cada una está dentro del radio máximo de visión del universo desde la otra. Sin embargo, la galaxia C está fuera del universo observable desde la posición de la A y viceversa.

estoy un poco más hay que concretar qué es lo que en física se entiende por movimiento. Para determinar si un cuerpo se mueve, en física primero hay que definir un *sistema de referencia* desde el que medir la posición del cuerpo en cuestión. Un sistema de referencia viene dado por otros cuerpos en la vecindad del cuerpo cuyo movimiento queremos estudiar y que suponemos están en reposo, pues sus posiciones relativas no cambian entre sí. Con esta definición de sistema de referencia podemos decir que el cuerpo objeto de nuestro interés está quieto en el sistema de referencia que hemos escogido si su posición con respecto a los otros cuerpos que lo definen no cambia con el tiempo; en caso contrario, decimos que está en movimiento. Pues bien, en nuestro ejemplo de la galaxia A y nuestra propia galaxia, las próximas a la galaxia A definen un sistema de referencia para el cual esta está en reposo, puesto que su posición no cambia con respecto a sus vecinas. Alguien muy estricto podría pensar que puesto que entre la galaxia A y sus vecinas hay cierta separación,

LA LEY DE HUBBLE

Con el paso del tiempo, la separación entre galaxias aumenta debido a la expansión del espacio entre ellas, y el resultado es perceptible desde la Vía Láctea al intentar observar a las galaxias A, B y C del ejemplo ofrecido en la figura 1. Esta muestra la evolución de la distancia entre galaxias según la ley de Hubble. Las tres dimensiones del espacio se han reducido a solo dos, para poder representar el paso del tiempo como páginas que se superponen unas sobre otras, con la más reciente arriba. La cuadrícula de trazos representa un hipotético sistema de coordenadas en el que estuvieran determinadas las posiciones de las galaxias. Puesto que el espacio aumenta con el transcurso del tiempo, el tamaño de la cuadrícula tiene que incrementarse. Sin embargo, al expandirse el universo cada galaxia permanece dentro de la cuadrícula en la que se encontraba inicialmente, es decir, sus coordenadas no cambian, de modo que localmente cada una está en reposo con respecto al sistema de coordenadas definido por la cuadrícula. A las coordenadas de este tipo se las llama *coordenadas comóviles*. Las galaxias no cambian de tamaño con el paso del tiempo puesto que se trata de sistemas ligados gravitatoriamente: la expansión del universo se debe a la aparición de más espacio, no al crecimiento de los objetos ligados gravitatoriamente. La diferencia de coordenadas χ entre dos objetos de la figura se llama *distancia comóvil*. A la distancia d medida en metros entre dos objetos en el mismo instante de tiempo se la llama *distancia propia*. La distancia propia y la distancia comóvil son proporcionales:

$$d = a(t)\chi.$$

El factor de proporcionalidad $a(t)$ recibe el nombre de factor de escala del universo. Se define de modo que en el presente ($t=t_0$) valga 1, de manera que en él los valores de las distancias propias y las distancias comóviles coincidan. Que el universo se expanda se traduce en que para tiempos t en el pasado $a(t) < 1$ y en el futuro $a(t) > 1$, es decir, el factor de escala crece con el tiempo. Para períodos de tiempo Δt pequeños comparados con la edad del universo:

$$a(t) \approx a(t_0) + H\Delta t = 1 + H\Delta t.$$

La constante H es la constante de Hubble.

El universo tiene el mismo aspecto desde cualquier punto

El hecho de que el factor de escala del universo crezca con el tiempo hace aumentar la distancia propia entre objetos del universo, lo que se traduce en que para cada uno (como las galaxias del ejemplo), el resto se separa con una velocidad v que es proporcional a la distancia propia a la que se encuentran, como se representa en la figura 2. Por ejemplo, según nuestro punto de vista, mostrado en la fila superior de dicha figura, las galaxias A, B y C se alejan de nosotros con velocidades que son proporcionales a la distancia propia entre ellas y nosotros. Pero alguien en la galaxia B observará también que las otras galaxias se alejan de él con velocidades que son proporcionales a la distancia propia entre cada galaxia y la galaxia B. Los objetos situados a una distancia $R_H = c/H$, llamada *distancia de Hubble*, se alejan a velocidades

mayores que la de la luz. Los círculos de la figura 1 tienen un radio igual de Hubble R_H y están centrados en nuestra galaxia y la galaxia B. Para que el universo tenga el mismo aspecto en todos sus puntos, las galaxias deben estar distribuidas uniformemente por la cuadrícula, con lo que hay algunas más alejadas que un radio de Hubble de nuestra galaxia o de la galaxia B y, en realidad, de cualquiera de la figura 1.

FIG. 1

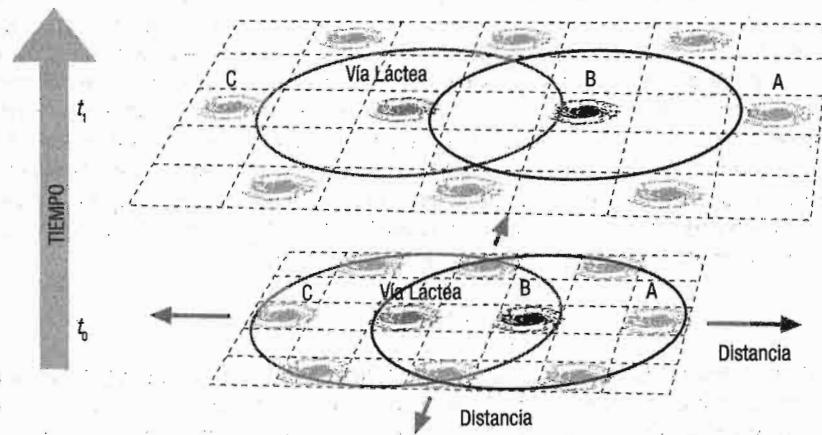
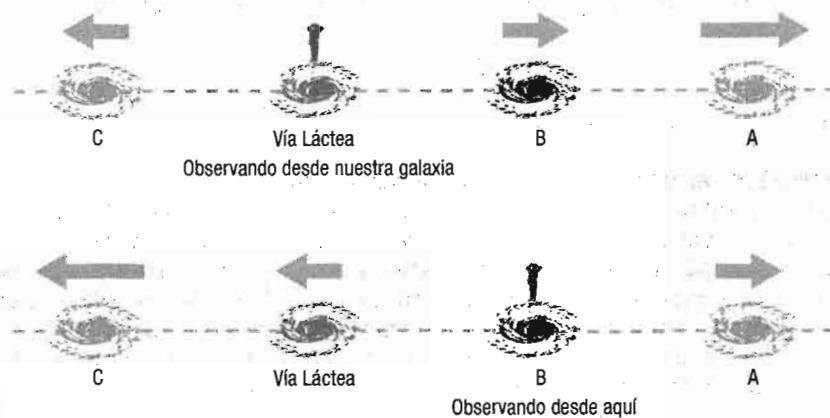


FIG. 2

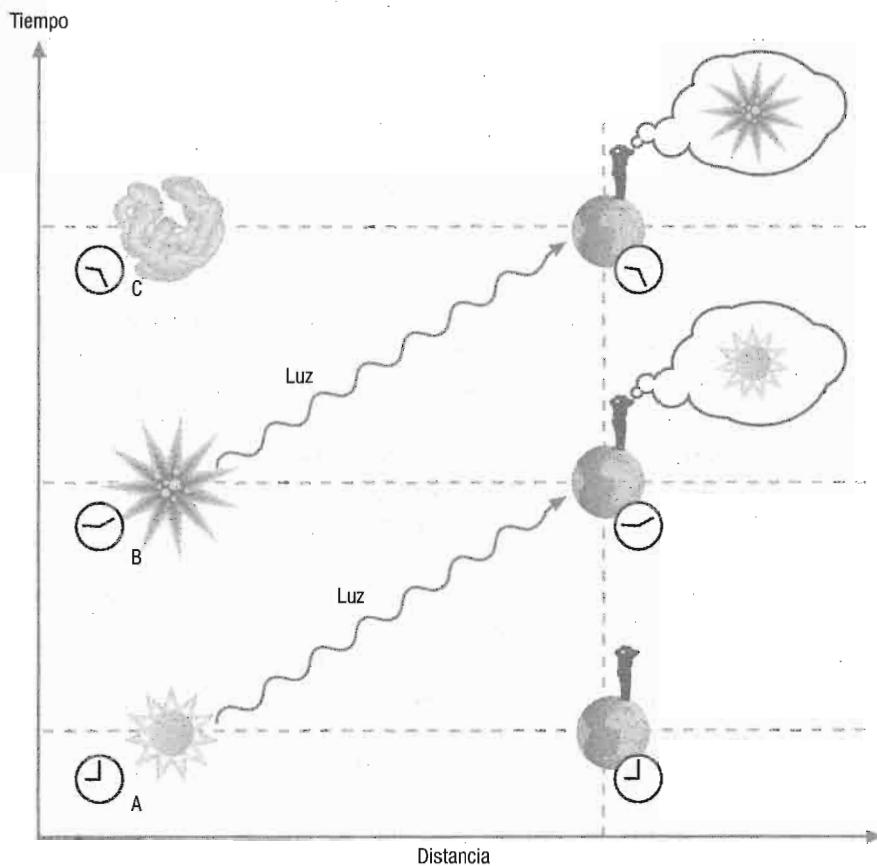


la ley de Hubble predice que estas últimas se alejarán de ella. Sin embargo, no hace falta que los cuerpos que definen el sistema de referencia sean galaxias: podemos imaginarnos otros cuerpos (estrellas solitarias, planetas errantes) todo lo próximos a la galaxia A que queramos de modo que la velocidad con la que se separan de ella sea todo lo pequeña que deseemos.

En este punto, quizá el lector pensará: «cierto, pero también se puede elegir como sistema de referencia a las galaxias cercanas a la nuestra y volvemos a la conclusión de que la galaxia A se mueve a mayor velocidad que la de la luz». Lo que haría el lector en este caso se conoce como «cambiar de sistema de referencia». Al cambiar de un sistema de referencia a otro, las velocidades cambian de valor según unas reglas bien establecidas por una parte de la física que se conoce como *relatividad especial*. Sin embargo, la descripción de la evolución del universo viene dada por otra parte de la física llamada *relatividad general*. Dentro de esta última siguen siendo válidas las reglas de la relatividad especial que se refieren al cambio de sistemas de referencia, pero solo cuando el cambio es de un sistema a otro en la misma región del espacio-tiempo. Puesto que la galaxia lejana A y nuestra galaxia están separadas por una distancia muy grande, no podemos aplicar la relatividad especial para hacer el cambio de un sistema de referencia definido en la vecindad de la galaxia A a otro definido en la vecindad de nuestra galaxia.

Al hablar de las galaxias que se encuentran alejadas de nosotros más allá del radio de Hubble hemos dicho que «la luz que salga de ellas en este momento nunca nos alcanzará». Esta frase parece decir que nunca podremos ver dichas galaxias. Sin embargo, tenemos que tener en cuenta que la luz que nos llega de una galaxia lejana ha tenido que recorrer mucha distancia antes de alcanzar nuestra posición (figura 2) y por tanto debió empezar su viaje mucho tiempo atrás, cuando la galaxia desde la que se emitió estaba más cerca de nosotros, y eso tiene ciertas consecuencias. La primera es que nosotros no vemos las galaxias lejanas como son en este momento, sino como eran cuando la luz salió de ellas. Pongamos por ejemplo una galaxia cuya luz ha viajado 100 millones de años (10^8 años) para llegar a nosotros. Eso im-

FIG. 2



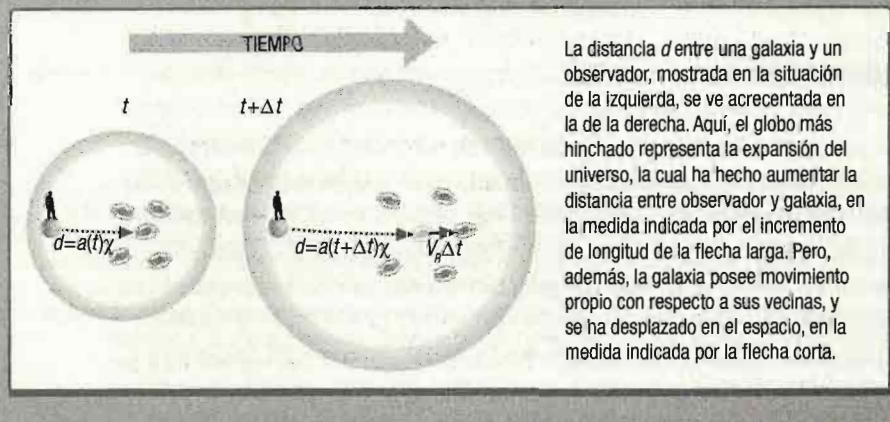
Siempre vemos un objeto tal como es en el momento en que la luz partió de él para llegar a nosotros. Cuanto más alejado esté ese objeto, más tiempo tarda la luz en recorrer la distancia que nos separa de él y mayor es el tiempo hacia atrás con el que lo vemos con respecto a nuestro presente. La figura muestra un ejemplo para una estrella lejana (en A) que explota como supernova (en B) para convertirse en una nebulosa (en C). En el momento en que estalla la supernova, un observador en la Tierra sigue viendo la estrella como era antes de estallar, y no se percata de la supernova hasta que la luz de esta le alcanza (en C, cuando hace tiempo que en su posición existe una nebulosa fruto del estallido). Los relojes al lado de la estrella y del observador indican de manera figurada el transcurso del tiempo tanto para la estrella como para el observador.

VELOCIDADES SUPERLUMÍNICAS

La ley de Hubble predice que, a partir de cierta distancia, las galaxias se alejan de nosotros a velocidades mayores que la de la luz, mientras que la relatividad especial dice que cualquier cuerpo con masa debe moverse a una velocidad inferior a la de la luz. Entre ambas afirmaciones no hay contradicción, ya que la relatividad especial trata de velocidades medidas con respecto a cuerpos cercanos (a escala cosmológica), que consideramos en reposo y que constituyen nuestro sistema de referencia para medir velocidades, mientras que la ley de Hubble es consecuencia de la expansión del universo. A menudo se explica dicha expansión usando un sencillo simulacro con un globo que se infla; el mismo simulacro nos sirve para explicar por qué ambas afirmaciones no entran en conflicto. Supongamos que una galaxia lejana, marcada por una flecha en el globo izquierdo de la figura, se mueve con respecto a sus galaxias vecinas, que supondremos en reposo. Si transcurre un tiempo Δt , el cambio en la distancia que nos separa de la galaxia en movimiento se debe, por un lado, a la expansión del universo (flecha larga), cuyo factor de escala pasa de valor $a(t)$ a valor $a(t+\Delta t)$, y por otro, al movimiento de la galaxia con respecto a sus vecinas (flecha corta), que vale $v_r \Delta t$, donde v_r es la velocidad de la galaxia con respecto a ellas. La velocidad v_r no puede ser mayor que la de la luz, según la relatividad especial, ya que está medida con respecto a cuerpos cercanos en reposo. La velocidad v que aparece en la ley de Hubble es:

$$v = \frac{a(t+\Delta t) - a(t)}{\Delta t} \chi,$$

donde χ es la distancia comovil (que no cambia debido a la expansión del universo) entre nosotros y el punto donde se encontraba inicialmente la galaxia en movimiento. El factor de escala a es una constante numérica sin dimensiones, así que v , al ser una distancia entre un tiempo, resulta ser una velocidad. La velocidad v es independiente de si una galaxia se mueve con respecto a sus vecinas o no, ya que casi es la misma para todas las de la figura, incluso para las que están en reposo, puesto que están prácticamente a la misma distancia de nosotros que la galaxia en movimiento.



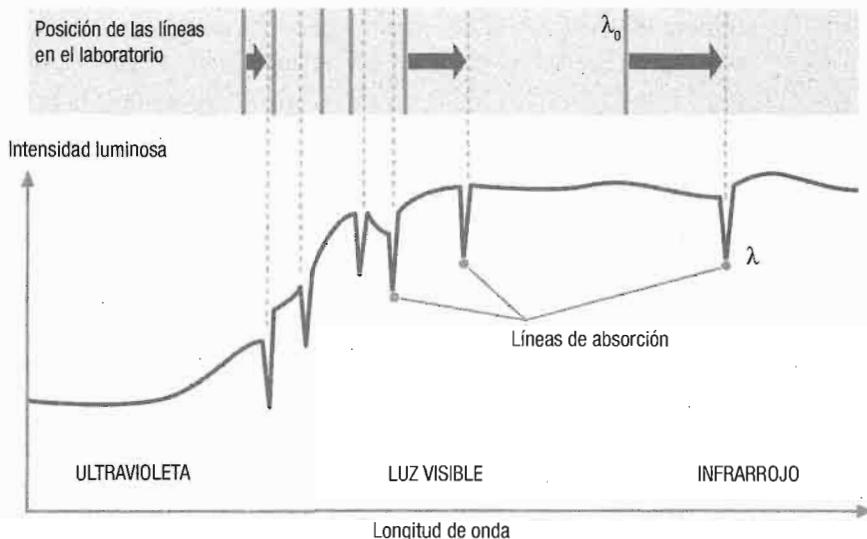
plica que vemos esa galaxia tal como era hace 100 millones de años y no como es ahora. Por tanto, cuanto más alejado esté un objeto, tanto más alejado en el pasado será el aspecto con que lo veremos. Por otro lado, y retomando el ejemplo, veremos la galaxia en cuestión donde estaba hace 100 millones de años y no donde está ahora, porque en los 100 millones de años que su luz ha tardado en llegar hasta nosotros ha seguido alejándose. Por tanto, es perfectamente posible que los objetos más alejados que podemos ver con los telescopios más potentes se encuentren en este momento más allá de un radio de Hubble. En conclusión, sí es posible que en este momento podamos ver galaxias que ahora mismo estén más allá de nuestro radio de Hubble, pero no las veremos donde están tal y como son en este instante, sino donde estaban y como eran en el momento en que la luz salió de ellas. En todo caso, solo nos es posible observar una parte, no sabemos si pequeña o grande, de todo el universo. La parte que podemos observar se llama *universo observable* o *metagalaxia*. Puede que el universo observable sea una parte pequeña de todo el universo, pero en todo caso es enorme comparado con la escala de distancias humanas: se calcula que en todo el universo observable hay unos 100 000 millones de galaxias (10^{11} galaxias), cada una con unos 100 000 millones de estrellas en promedio (10^{11} estrellas). En comparación, hay ahora mismo en la Tierra, en números redondos, unos 7 000 millones de personas ($7 \cdot 10^9$ personas).

EL DESPLAZAMIENTO AL ROJO

La luz que nos llega de las galaxias lejanas también experimenta otro fenómeno: se encuentra desplazada hacia longitudes de onda más grandes, o como dicen los astrónomos: «desplazada hacia el rojo». Las galaxias no emiten solo luz visible, sino radiación electromagnética en prácticamente todo el rango de longitudes de onda del *espectro electromagnético*. Ordenadas de menor a mayor longitud de onda, las regiones del espectro electromagnético en las que emiten las galaxias son: rayos X, luz ultravioleta, luz visible, luz infrarroja y ondas de radio. Den-

tro de la luz visible, el violeta y el rojo se corresponden con las dos longitudes de onda que marcan los límites de aquella que podemos ver: el violeta a una longitud de onda más corta que el rojo, con el resto de colores del arcoíris entre ambos extremos. La intensidad de la radiación electromagnética emitida por una galaxia no se reparte por igual en todas las longitudes de onda: en algunas de ellas hay más emisión que en otras. A la gráfica de la intensidad frente a la longitud de onda se la llama *espectro de la galaxia*. En el espectro de una galaxia suele haber regiones en las que apenas hay intensidad; esas regiones se llaman *líneas de absorción*. Su existencia se debe a que la radiación emitida por la galaxia procede principalmente de sus estrellas, mientras que el gas que existe en la galaxia absorbe parte de la radiación emitida por ellas, pero solo en determinadas longitudes de onda que dependen de su composición química. Los astrónomos tienen tabuladas las longitudes de onda a las que absorben la radiación electromagnética en estado gaseoso muchas moléculas o átomos aislados, porque las líneas de absorción de un determinado tipo de molécula son como su «huella dactilar»: su presencia en un espectro permite determinar el tipo de sustancia que absorbió la luz a partir del patrón observado de líneas de absorción. Pues bien, cuando se examina el espectro de una galaxia lejana se observan los mismos patrones de líneas de absorción de moléculas y átomos que existen en la Tierra, pero sus posiciones en el espectro se hallan desplazadas hacia longitudes de onda más grandes (figura 3). Por ejemplo, una línea de absorción que medida en un laboratorio de la Tierra tiene una longitud de onda correspondiente a la luz azul, puede aparecer en el espectro de una galaxia lejana en longitudes de onda correspondientes al rojo, de ahí el nombre de *desplazamiento al rojo* de este fenómeno. Para cuantificar el desplazamiento al rojo de una galaxia, los astrónomos comparan la longitud de onda λ_0 de una determinada línea de absorción medida en un laboratorio en la Tierra con la longitud de onda λ de la misma línea de absorción en el espectro de una galaxia lejana. Si λ es mayor que λ_0 , el desplazamiento al rojo z es positivo y cuanto mayor es la diferencia $\lambda - \lambda_0$, mayor es el desplazamiento al rojo.

FIG. 3



Aspecto esquemático del espectro de una galaxia. Los valores de la longitud de onda en los que disminuye la intensidad luminosa de la luz que recibimos de la galaxia se llaman líneas de absorción porque se deben a la absorción selectiva de la radiación electromagnética por la materia de la galaxia. Comparadas con las líneas que se miden en un laboratorio en la Tierra, las líneas galácticas aparecen desplazadas hacia longitudes de onda más grandes, o como se suele decir, desplazadas hacia el rojo. Se llama desplazamiento al rojo z del espectro a:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

El cambio en la longitud de onda $\Delta\lambda$ que experimenta cada línea aumenta con la longitud de onda de la línea en cuestión, pero el desplazamiento al rojo z tiene el mismo valor para todas las líneas del espectro.

Ahora bien, ¿cuál es la causa de que las líneas de absorción de los espectros de las galaxias lejanas estén desplazadas a longitudes de onda más grandes? La razón es la expansión del universo descrita por la ley de Hubble. Para entenderlo, volvámonos a imaginarnos una galaxia lejana, como la que ya llamamos galaxia A, y supongamos por simplificar que esta emite luz solo en una única longitud de onda λ_0 . Llámemos d_0 a la distancia entre la galaxia A y la nuestra cuando la luz de la primera inició su viaje

EL DESPLAZAMIENTO AL ROJO DE LA LUZ

La expansión del universo hace que la luz que nos llega de galaxias lejanas tenga una longitud de onda λ más grande que la que tenía cuando fue emitida, λ_0 . En la figura, la galaxia de la izquierda es la nuestra, y la de la derecha es una galaxia distante que se aleja de nosotros debido a la expansión del universo. La luz que nos llega de la galaxia lejana salió de ella cuando la distancia entre esa galaxia y la nuestra era d_0 . Si llamamos c a la velocidad de propagación de la luz, la de la galaxia lejana tarda en llegar a nosotros un tiempo $\Delta t = d_0/c$. Durante ese tiempo el universo se expande de acuerdo con la ley de Hubble, de modo que cuando la luz de la galaxia lejana llega a nosotros, la distancia a la que se encuentra es d . La expansión del universo hace aumentar todas las longitudes menos las de aquellos cuerpos que estén ligados por alguna fuerza interna, como la gravedad en el caso de las galaxias o la cohesión interna en el caso de los cuerpos sólidos. Como la longitud de onda de la luz es una distancia, la expansión del universo hace aumentar la longitud de onda de la luz emitida por la galaxia lejana en la misma proporción en la que aumenta la distancia entre ella y nosotros. Por tanto:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{d}{d_0}$$

Si la velocidad de recesión de la galaxia es v , la distancia que recorre la galaxia lejana durante el tiempo Δt es $v\Delta t$, de modo que:

$$d = d_0 + v\Delta t = d_0 + v \frac{d_0}{c}.$$

La velocidad de recesión de la galaxia viene dada por la ley de Hubble, de manera que $v = Hd$, donde H es la constante de Hubble, así que:

$$d = d_0 + H \frac{dd_0}{c}.$$

Con lo que la relación entre las longitudes de onda λ y λ_0 queda:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = 1 + \frac{Hd}{c}.$$

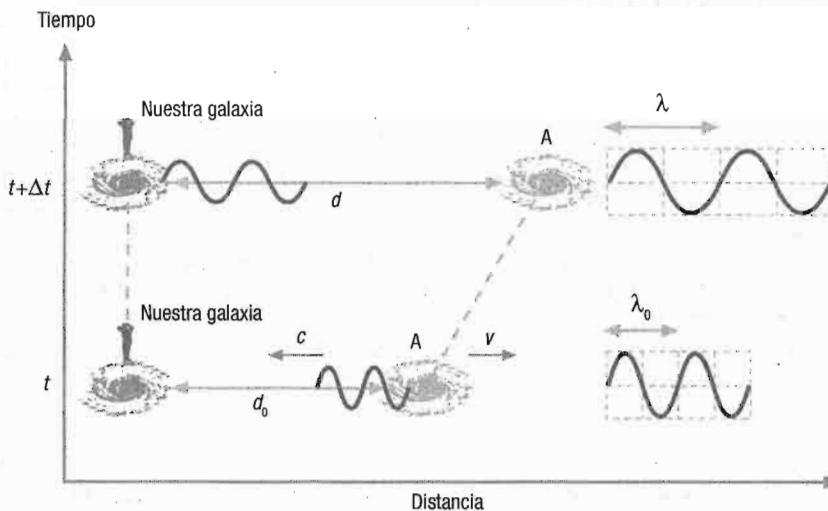
Los astrónomos miden el desplazamiento al rojo z usando la fórmula:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\lambda}{\lambda_0} - 1.$$

Combinando las dos últimas fórmulas, encontramos una relación entre el desplazamiento al rojo z y la distancia a la que se encuentra en la actualidad una galaxia lejana:

$$z = \frac{H}{c} d.$$

Este razonamiento solo es válido para galaxias que no estén muy alejadas de nosotros, pues



en caso contrario hay que tener en cuenta que la velocidad de recesión de una galaxia aumenta conforme se va alejando de nosotros. En la práctica, esta restricción se traduce en que la relación entre desplazamiento al rojo y distancia que hemos encontrado solo es válida para desplazamientos al rojo menores que 1. Combinando el resultado anterior con la ley de Hubble resulta que la velocidad a la que una galaxia se aleja de nosotros vale: $v \simeq cz$ para desplazamientos al rojo menores que 1.

Un vistazo al pasado

Cuanto mayor es el desplazamiento al rojo de una galaxia lejana, mayor es la distancia que ha tenido que recorrer su luz para llegar hasta nosotros y más grande es el tiempo invertido en recorrerla. Eso significa que la luz que nos llega de esa galaxia nos muestra cómo era mucho tiempo atrás. En resumen, cuanto mayor es el desplazamiento al rojo de una galaxia, más alejada está y menor es su edad comparada con la del universo.

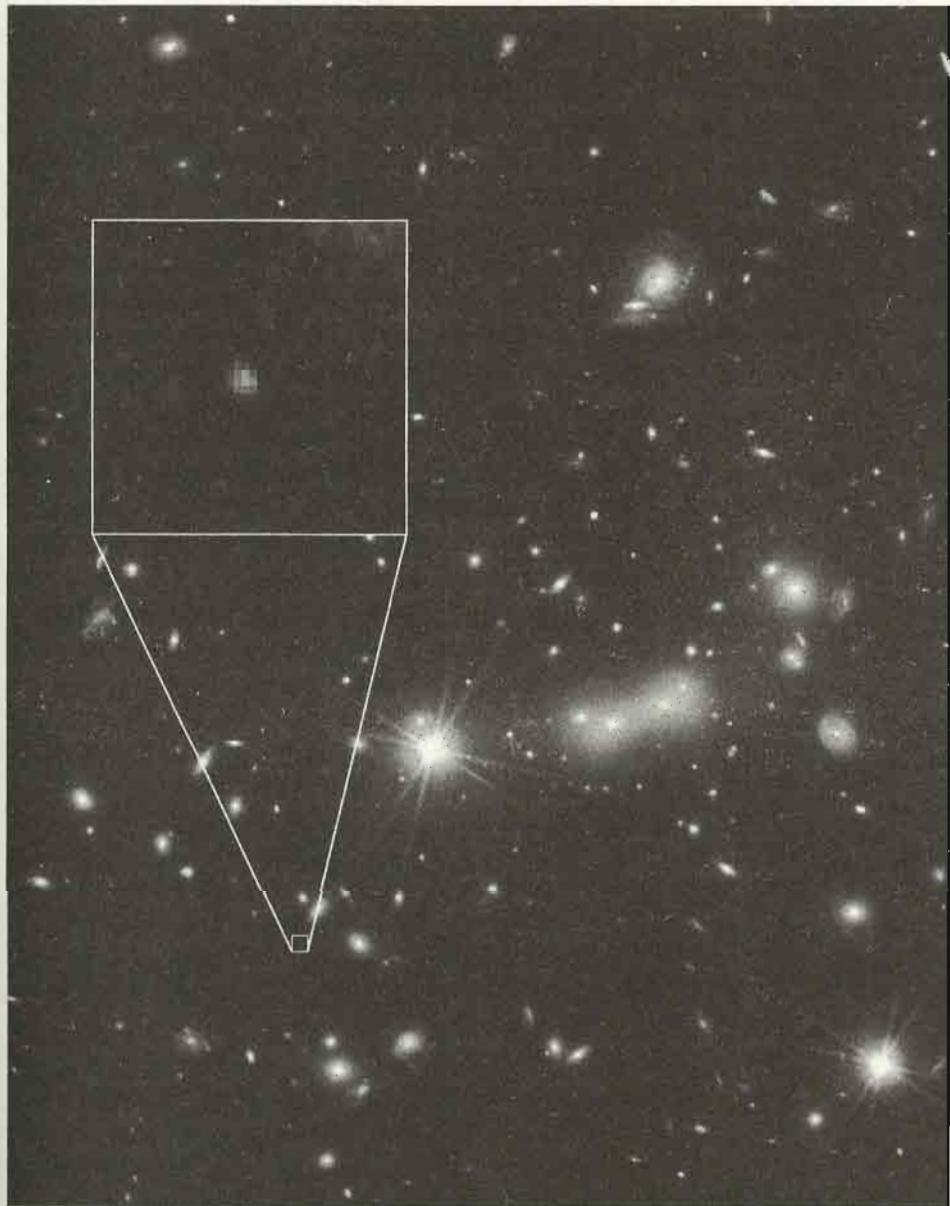
Campo ultraprofundo del telescopio espacial Hubble, una panorámica que muestra algunas de las galaxias más lejanas conocidas.



hacia nosotros. Durante el tiempo que la luz de la galaxia A esté viajando hacia nosotros el universo se expande, de modo que la distancia entre ella y nuestra galaxia en el momento en que nos llega su luz pasa a valer d , que será una distancia mayor que d_0 . Como la longitud de onda es una distancia, la de la luz que parte de la galaxia A ha de aumentar en la misma medida que lo hace la distancia entre la galaxia A y nuestra galaxia, de modo que cuando la luz de la primera llegue a nosotros su longitud de onda será λ , mayor que λ_0 ; en otras palabras, la luz que nos llega de la galaxia A estará desplazada hacia el rojo. Este razonamiento que hemos aplicado a la luz no es válido para los objetos que están ligados, bien por ser rígidos, como una hipotética nave espacial, bien por la presencia de fuerzas gravitatorias, como un planeta, una estrella o una galaxia: las dimensiones de estos objetos no cambian debido a la expansión del universo.

El argumento del párrafo anterior explica también por qué el desplazamiento al rojo del espectro de una galaxia lejana está relacionado con la distancia a la que esa galaxia se encuentra de nosotros. Cuanto mayor sea la distancia d_0 entre una galaxia lejana y la nuestra en el momento en que la luz de aquella empezó a viajar hacia nosotros, más tiempo tiene que invertir su luz en llegar hasta aquí y mayor será la expansión del universo durante ese tiempo, con lo que el desplazamiento z hacia el rojo de la luz de la galaxia lejana será mayor cuando llegue a nosotros. En resumen, cuanto mayor es el valor del desplazamiento al rojo z del espectro de una galaxia, mayor es la distancia d_0 a la que estaba de nosotros cuando la luz partió de ella y mayor todavía será la distancia d a la que se encuentra ahora de nosotros. Para desplazamientos al rojo pequeños o moderados (en términos numéricos menores que 1) el desplazamiento al rojo de una galaxia es proporcional a la distancia a la que se encuentra de nosotros en este momento y también es proporcional a la velocidad con la que esa galaxia se aleja de nosotros.

Las galaxias más lejanas que se han observado tienen desplazamientos al rojo mayores que 1, del orden de $z \approx 7$. Las fórmulas anteriores nos dicen que estas galaxias se alejan a velocidades mayores que la velocidad de la luz, es decir, que están más allá



La galaxia MACS0647-JD, mostrada ampliada en el recuadro, es una de las más distantes conocidas. Fue captada gracias a un efecto de lente gravitatoria ejercido por el cúmulo de galaxias MACS J0647+7015.

de un radio de Hubble de nosotros. En realidad, para valores del desplazamiento al rojo z mayores que 1 las fórmulas son más complicadas, porque esas galaxias están tan alejadas que para calcular la distancia a ellas y la velocidad con la que se alejan hay que tener en cuenta los cambios en la constante de Hubble con el paso del tiempo durante casi toda la edad del universo. No obstante, teniendo en cuenta todo esto sigue siendo cierto que estas galaxias se alejan de nosotros a una velocidad mayor que la de la luz. Por ejemplo, los cálculos completos para una galaxia con $z=7$, según lo que sabemos de la evolución del universo, dan un valor de la distancia actual d de 28 800 millones de años-luz y de la velocidad de recesión actual de $v \approx 600\,000$ km/s. Para llegar hasta nosotros, la luz de una galaxia con un desplazamiento al rojo de ese valor tuvo que partir cuando el universo tenía solo 770 millones de años de edad. Por poner otro ejemplo, la radiación electromagnética del fondo cósmico de microondas tiene un desplazamiento al rojo de $z \approx 1\,100$, lleva viajando desde que el universo tenía unos 380 000 años de edad y la distancia actual d desde nuestra galaxia hasta el punto de emisión de cada uno de sus fotones es de unos 45 000 millones de años-luz.

ASPECTO DEL UNIVERSO A GRAN ESCALA

Hasta ahora hemos hablado de las galaxias suponiendo que están distribuidas uniformemente por todo el universo. Sin embargo, esto no es así. La mayoría forman agrupaciones con galaxias vecinas. Las agrupaciones más pequeñas reciben el nombre de *grupos*. Un grupo suele estar formado por unas pocas decenas de galaxias, entre las que hay un número reducido de muy grandes; el resto son galaxias más pequeñas que orbitan alrededor de las mayores. Todas las galaxias del grupo están unidas gravitatoriamente. Esto significa que la expansión del universo no separa entre sí las galaxias de un grupo, o en otras palabras, que un grupo de galaxias se mantiene unido a pesar de que el universo se expande. Aunque hablamos de galaxias «pequeñas» o «grandes», el tamaño de todas ellas es enorme. Por ejemplo, las

galaxias «enanas» tienen diámetros situados entre los 300 y los 30 000 años-luz, mientras que las galaxias más grandes tienen diámetros del orden de 150 000 años-luz.

Otro tipo de agrupación de galaxias son los *cúmulos*. Los cúmulos son agrupaciones con un mayor número de miembros que los grupos, que puede llegar al orden de varios miles de galaxias. En cuanto a su extensión espacial, un cúmulo de galaxias típico tiene un diámetro del orden de 10 millones de años-luz. En la actualidad, se conocen alrededor de 10 000 cúmulos. Las galaxias de un cúmulo también están unidas gravitatoriamente, es decir, la expansión del universo no separa entre sí sus integrantes. Además, están inmersas en un gas muy tenue y caliente formado principalmente por hidrógeno y helio. La temperatura de este gas es de 10 a 100 millones de K (kelvins) y su densidad es tan baja que solo presenta del orden de 100 a 1 000 átomos por metro cúbico. Aun con esas densidades tan bajas, el tamaño tan enorme de los cúmulos hace que la cantidad de gas que contienen sea formidable. En uno suele haber al menos tanta masa en forma de gas como la de todas las galaxias del cúmulo, y de hecho en la mayoría de los que se han estudiado la masa del gas es mayor que la de las galaxias que los componen.

Dentro de los grupos y los cúmulos, las galaxias están distribuidas de modo que la distancia entre ellas es del mismo orden que el diámetro de las propias galaxias. Podemos decir que dentro de los cúmulos las galaxias están «apretadas» y, en consecuencia, son «frecuentes» las colisiones o los roces entre ellas. Lo de «frecuentes» hay que tomarlo en sentido figurado: una colisión galáctica puede prolongarse durante cientos de millones de años. Sin embargo, este periodo de tiempo es tan pequeño comparado con la edad del universo que cualquier galaxia ha sufrido probablemente un buen número de colisiones a lo largo de su existencia, perdiendo parte de la materia que la forma, o mezclándose con otras galaxias como resultado de la colisión. Por ejemplo, nuestra Vía Láctea está ahora mismo colisionando con la galaxia enana de Sagitario, la cual está situada a tan

El final de nuestra exploración consistirá en llegar a allí donde empezamos.

T.S. ELIOT

«solo» 80 000 años-luz de la Tierra y acabará siendo incorporada a nuestro cuerpo galáctico.

Los cúmulos no son el tipo de agrupación más grande que existe en el universo, puesto que a su vez los cúmulos de galaxias no se distribuyen homogéneamente por él. Al contrario, forman filamentos y láminas interconectados entre sí como una red tridimensional en cuyas cavidades casi no hay galaxias y se supone que tampoco hay prácticamente gas. El diámetro de estas cavidades es del orden de 150 millones de años-luz, es decir, unas mil veces el diámetro de una galaxia grande. Los mayores de estos filamentos tienen una longitud del orden de 1 000 millones de años-luz. Estas estructuras se han formado por la acción de la gravedad a lo largo de la historia del universo y, con los conocimientos actuales, se supone que todavía están en proceso de formación y no se sabe si están o no ligadas gravitatoriamente, es decir, si la expansión del universo acabará deshaciéndolas. En la imagen de las págs. 38-39 puede verse un ejemplo de orden de escalas en el universo.

Llegados a este punto, algún lector pensará que hemos hecho trampa. Al principio de este capítulo dijimos que el universo es homogéneo e isótropo y ahora parece que estamos diciendo lo contrario, pues hay regiones en él prácticamente vacías de materia, mientras que en otras esta está concentrada. La aparente contradicción se resuelve puntualizando que el universo es homogéneo e isótropo cuando se lo considera a gran escala, es decir, cuando consideramos regiones del universo de tamaños mayores que los 1 000 millones de años-luz mencionados para el tamaño de los filamentos. Al hablar del desplazamiento al rojo, hemos visto que podemos observar galaxias que ahora mismo están a una distancia de 28 000 millones de años-luz, es decir, el tamaño del universo sobre el que podemos hacer observaciones es bastante más grande que las estructuras más grandes que contiene. A esa escala, el universo sí es homogéneo e isótropo, pues los filamentos y las cavidades se distribuyen de forma uniforme. Además, hemos de recordar que el universo observable es solo una parte de todo el universo, y que no sabemos qué tamaño puede tener en su totalidad.

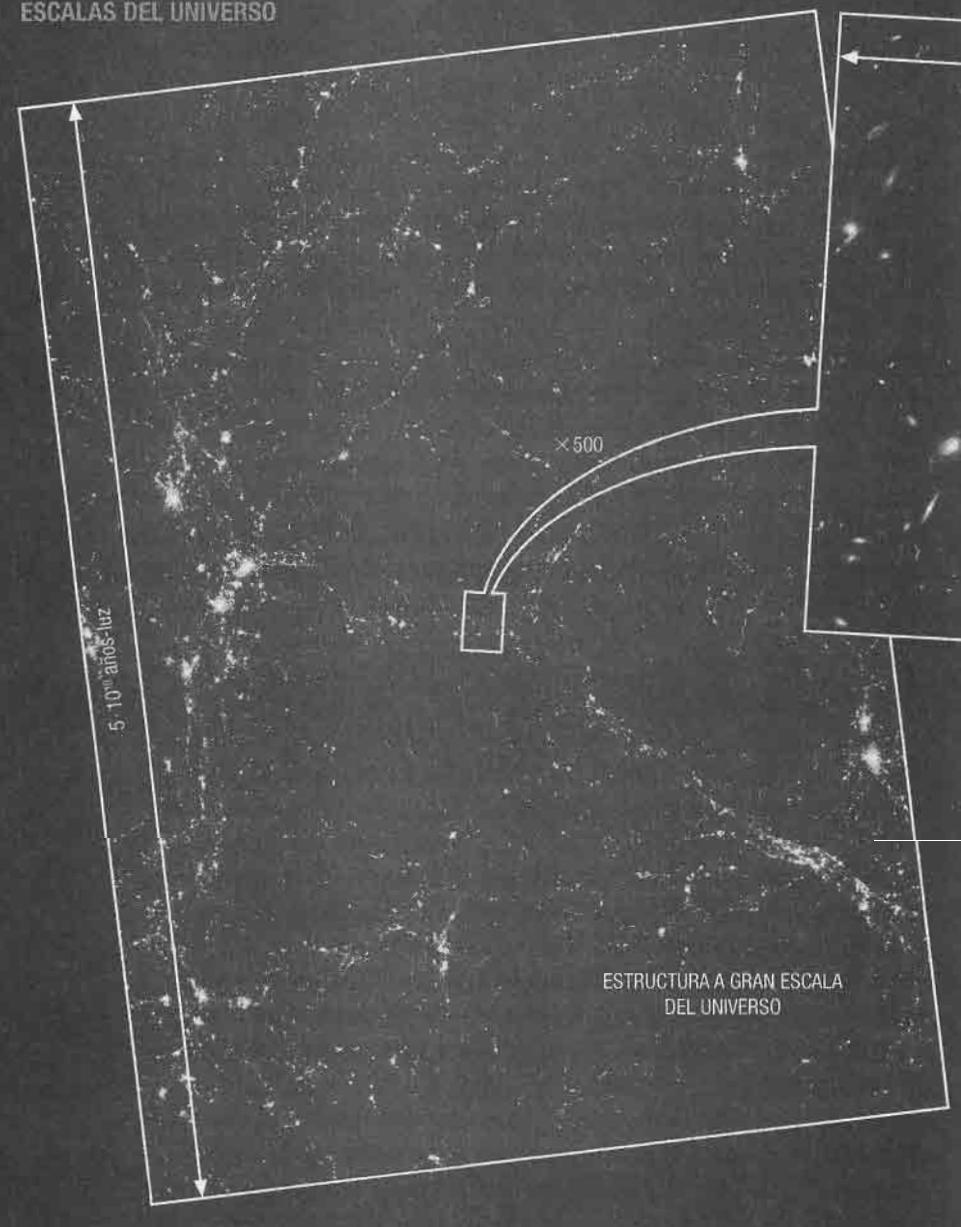
COMPOSICIÓN DEL UNIVERSO

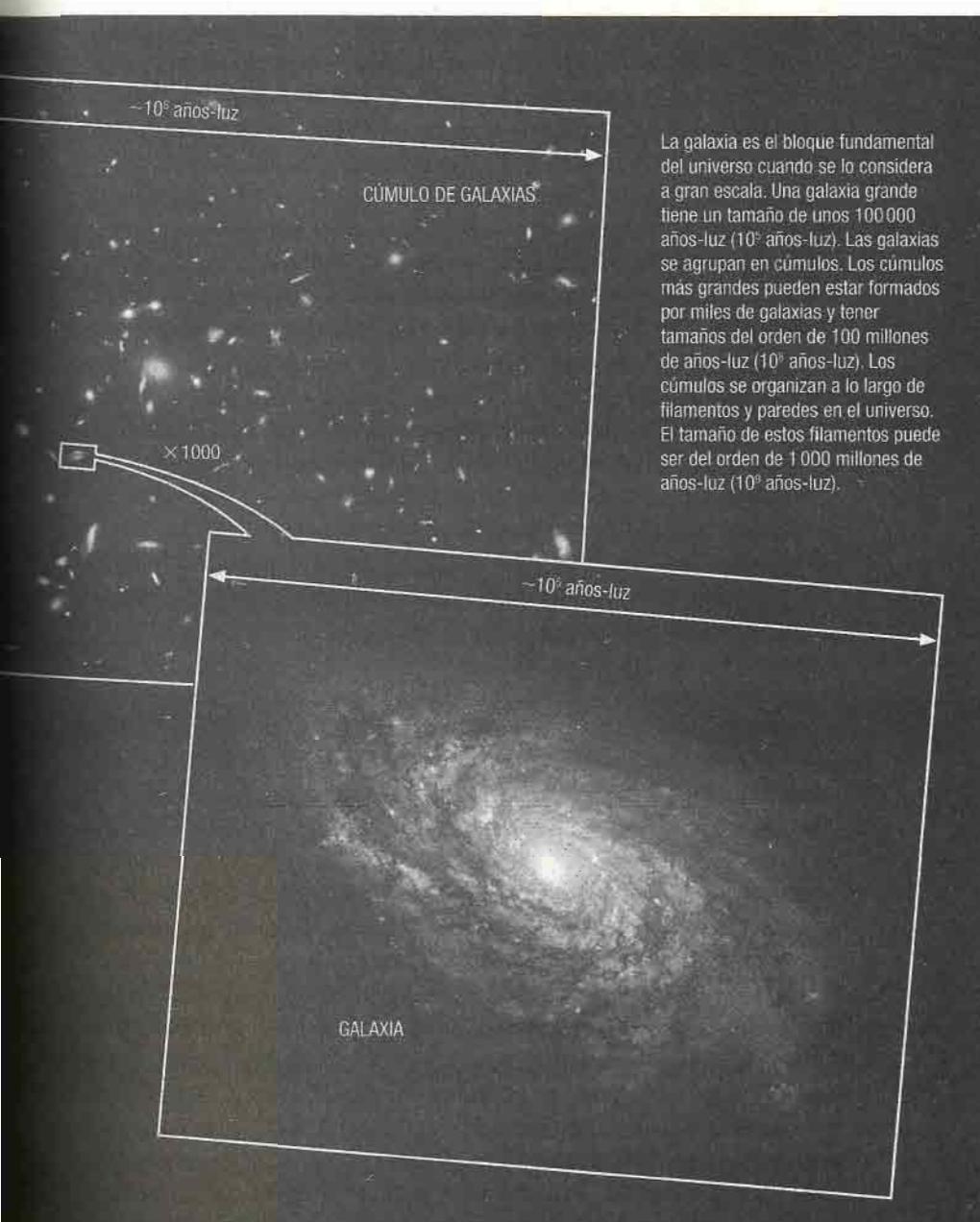
Al hablar del aspecto del universo a gran escala hemos mencionado las galaxias y el gas intergaláctico de los cúmulos de galaxias. Ambos componentes son materia ordinaria, es decir, materia formada por átomos como la que tenemos a nuestro alrededor. La materia ordinaria también recibe el nombre de *materia bariónica* porque los protones y neutrones que forman el núcleo de los átomos reciben el nombre conjunto de *bariones*. Aparte de la materia ordinaria hay otros componentes del universo. Uno que hemos pasado por alto es la radiación electromagnética, tanto la emitida por las galaxias como la del fondo cósmico de microondas. La radiación electromagnética está formada por fotones, que aunque no sean materia, sí transportan energía. La famosa relación entre la masa y la energía, $E=mc^2$, descubierta por Einstein, nos dice que la energía transportada por cada fotón equivale a una pequeñísima cantidad de masa y, por tanto, contribuye a las fuerzas gravitatorias que unas partes del universo ejercen sobre otras.

La materia oscura

Además de la materia ordinaria y la radiación electromagnética, los astrónomos han descubierto que hay otros componentes del universo, las llamadas *materia oscura* y *energía oscura*. La primera evidencia de la existencia de materia oscura se obtuvo a partir de las velocidades de las galaxias agrupadas en cúmulos. Como dijimos, dichos cúmulos están ligados gravitatoriamente. Esto significa que en ellos las galaxias orbitan unas alrededor de las otras bajo la acción del campo gravitatorio creado por ellas y el gas del cúmulo. Para que las galaxias de un cúmulo no escapen de él, sus velocidades tienen que estar por debajo de cierto límite que depende de la masa total del cúmulo. Esta situación es la misma que la que experimenta un cohete que se lanza desde la Tierra: si no alcanza suficiente velocidad, volverá a caer hacia la superficie terrestre, pero a partir de un cierto

ESCALAS DEL UNIVERSO





valor límite, la llamada *velocidad de escape*, puede abandonar el planeta y alejarse indefinidamente de él. La velocidad de escape de la Tierra depende de la gravedad terrestre, que a su vez depende de la masa del planeta. Del mismo modo, la velocidad de escape de un cúmulo depende de la masa total del cúmulo. Pues bien, si solo se considera la masa que hay en las galaxias y el gas del cúmulo, la velocidad de escape que se calcula es menor que las velocidades individuales de las galaxias que lo componen, con lo que para poder explicar por qué el cúmulo está ligado gravitatoriamente hay que admitir que en él hay más masa aparte de la que aportan el gas y las galaxias, es decir, que hay algo más que materia ordinaria. Como nosotros detectamos el gas y las galaxias de un cúmulo por la radiación electromagnética que emiten, y en cambio no recibimos ningún tipo de radiación de la materia que contribuye a la masa adicional del cúmulo, los astrónomos llaman a esta última «materia oscura». La mayor parte de la masa de un cúmulo está en forma de materia oscura. Los astrónomos han encontrado que esto mismo ocurre con las galaxias: la mayor parte de la masa de una galaxia es materia oscura.

Podría pensarse en un principio que la materia oscura es simplemente materia ordinaria que no podemos ver, bien porque no está emitiendo radiación electromagnética, bien porque su emisión es tan débil que no somos capaces de detectarla. Sin embargo, existen dos razones por las que se puede descartar que la materia oscura sea materia ordinaria. En primer lugar está el hecho de que los astrónomos saben que la composición original de la materia ordinaria del universo se divide en un 75% de masa de hidrógeno y un 25% por cierto de masa de helio, o en términos de abundancia de átomos, 12 átomos de hidrógeno por cada átomo de helio, ya que un átomo de helio pesa cuatro veces más que un átomo de hidrógeno. Además de la proporción entre hidrógeno y helio, lo importante de este hecho es que en la composición original del universo no había átomos más pesados, si exceptuamos una fracción muy pequeña de litio. El helio del 25% de la masa original se formó durante los primeros minutos del universo, cuando este era todavía tan denso y caliente que po-

dían darse en él reacciones de fusión nuclear que transformaran los protones y neutrones que hasta entonces vagaban libres en núcleos de helio. Conforme el universo se expandió, este se enfrió y se hizo menos denso, lo que interrumpió las reacciones de fusión nuclear, dejando su composición química original en el citado 75% de hidrógeno, un 25% de helio y trazas de litio sin elementos más pesados. Ahora bien, el porcentaje de helio y la cantidad de litio dependen de la densidad de la materia ordinaria en el universo. A mayor densidad, mayor frecuencia de las colisiones entre protones y neutrones, y mayor cantidad de helio y litio se habría formado. La cantidad de materia ordinaria que existe en forma de galaxias y gas intergaláctico en los cúmulos se corresponde con la composición original del universo de un 75% de hidrógeno y un 25% de helio, así que el resto de la masa de los cúmulos no puede ser materia ordinaria.

La segunda razón por la que la materia oscura no puede ser materia ordinaria es que a partir de la observación de las más lejanas, los astrónomos pueden saber cuánto tardaron en formarse las primeras galaxias. Estas se formaron cuando el gas de hidrógeno y helio comenzó a densificarse por la acción de la gravedad en determinadas regiones del universo. Pero el hidrógeno y el helio no eran los únicos componentes de este en aquella época: también estaban los fotones del fondo cósmico de microondas, que entonces eran mucho más energéticos de lo que son ahora. La interacción entre los fotones del fondo cósmico de microondas y los átomos de hidrógeno y helio tenía que retardar la densificación del gas porque los fotones dispersaban a estos últimos alejándolos de las regiones más densas. Si se hacen los cálculos con la cantidad de materia ordinaria que hay en el universo, el tiempo que se obtiene para la formación de las primeras galaxias excede el que se determina a partir de las observaciones de galaxias lejanas. Por tanto, es necesario que haya más materia que la materia ordinaria en el universo y además que esa materia sea «oscura», o sea, que no interaccione con la radiación electromagnética para que pueda densificarse por la acción de la gravedad sin ser dispersada por los fotones del fondo cósmico de microondas. No sabemos con certeza nada más de la materia

oscura aparte del hecho de que interacciona gravitatoriamente pero no con la radiación electromagnética.

La energía oscura

El último componente del universo es la energía oscura. Su descubrimiento se debe al estudio de los cambios en la tasa de expansión del universo a lo largo de su historia. Al hablar de la relación entre el valor de la constante de Hubble y la edad del universo dijimos que la atracción gravitatoria entre galaxias tiende a ralentizar la expansión de este último, por lo que es de esperar que en el pasado la tasa a la que se expandía fuese mayor que en la actualidad. A partir de las densidades de materia ordinaria y materia oscura que hay en el universo es posible calcular cómo ha cambiado su tasa de expansión a lo largo de su historia y determinar de forma exacta la relación entre desplazamiento al rojo z y distancia d para galaxias con z mayor que uno. Para comprobar los cálculos hay que determinar la distancia a galaxias muy lejanas por un procedimiento que no implique usar la ley de Hubble y compararla con la predicha por ellos. El procedimiento usado para medir distancias a galaxias muy lejanas se basa en cierto tipo de supernovas, las *supernovas Ia*, que tienen todas ellas una *luminosidad intrínseca* parecida. La luminosidad intrínseca es la energía por unidad de tiempo que radia un objeto, de modo que todas estas supernovas tendrían el mismo brillo si todas estuvieran a la misma distancia de la Tierra. En astronomía, el brillo se mide en magnitudes: cuanto menor es la magnitud de un objeto, más brillante es. La luminosidad intrínseca de un objeto está relacionada con su magnitud absoluta, que mide el brillo que tendría un objeto si estuviera a una distancia de 32,6 años-luz de la Tierra. Así pues, todas las supernovas tipo Ia tienen aproximadamente la misma magnitud absoluta. Por el contrario, la magnitud aparente mide el brillo con el que nosotros vemos un objeto desde la Tierra. Cuanto mayor es la magnitud aparente (menos brillo visto desde la Tierra) de una supernova, mayor es la distancia a la supernova en

cuestión, del mismo modo que de noche podemos hacernos una idea de lo distante que está un coche que viene de frente por la carretera a partir del brillo con el que vemos sus luces. Cuando se comparó la distancia obtenida a partir del brillo de las supernovas con la calculada a partir de la ley de Hubble se encontró que para que ambos resultados concordaran era necesario que la tasa de expansión del universo hubiera ido decreciendo de valor, como corresponde al efecto de la atracción gravitatoria de la materia ordinaria y la materia oscura, hasta cierta época de la historia del universo, pero que aumentase de valor a partir de entonces. El aumento de la tasa de expansión del universo con el tiempo significa que unas partes de este se repelen con respecto a las otras. Puesto que la materia, tanto ordinaria como oscura, se caracteriza porque se atrae gravitatoriamente, es necesario postular la existencia de otro componente adicional del universo, que se caracterice porque su interacción gravitatoria sea repulsiva. Como este componente adicional no puede ser materia, el término más comúnmente empleado para referirse a él es el de energía oscura.

En la figura 4 se muestran los componentes del universo y su relación con las cuatro interacciones fundamentales.

La evolución temporal de la constante de Hubble depende del contenido de materia —ordinaria y oscura— y energía oscura del universo. En la actualidad, las densidades de los distintos componentes del universo son:

Materia ordinaria: $3,8 \cdot 10^{-31} \text{ g/cm}^3$.

Materia oscura: $2,09 \cdot 10^{-30} \text{ g/cm}^3$.

Energía oscura: $7,03 \cdot 10^{-30} \text{ g/cm}^3$.

Radiación: $4,7 \cdot 10^{-34} \text{ g/cm}^3$.

Donde la masa correspondiente a la energía oscura y la radiación se ha calculado usando la relación $E=mc^2$. Los valores se corresponden con unas proporciones de un 68% de energía oscura, un 27% de materia oscura, un 5% de materia ordinaria y un 0,005% de radiación electromagnética. De la competencia entre la repulsión ejercida por la energía oscura y la atracción

FIG. 4

	COMPONENTES DEL UNIVERSO			
	Materia ordinaria	Radiación electromagnética	Materia oscura	Energía oscura
INTERACCIONES FUNDAMENTALES				
Nuclear fuerte	✓	✗	✗	✗
Nuclear débil	✓	✗	✗	?
Electromagnética	✓	✗	✓	✗
Gravitatoria	✓	✓	✓	✓

Hay cuatro componentes básicos en el universo y cuatro interacciones fundamentales. Gracias a la interacción nuclear fuerte, los protones y los neutrones de la materia ordinaria se mantienen dentro de los núcleos atómicos. Las demás partículas de la materia ordinaria (electrones y neutrinos) no sienten esta interacción. La interacción nuclear débil es la responsable de ciertas transmutaciones entre unas partículas elementales y otras. La sienten todas las partículas de materia ordinaria y se supone que también las que forman la materia oscura. La interacción electromagnética actúa entre partículas con carga eléctrica: la sienten todas las partículas de materia ordinaria menos los neutrinos y se debe al intercambio de fotones, las partículas que forman la radiación electromagnética. La interacción gravitatoria es sentida por todos los componentes del universo. Solo la interacción electromagnética y la gravitatoria tienen alcance infinito; por esa razón toda la información que teóricamente podemos recoger sobre otros lugares del universo es trasportada por estas dos interacciones, aunque mientras no existan telescopios de ondas gravitatorias, solo podemos observar el universo gracias a la radiación electromagnética.

gravitatoria del resto de componentes del universo depende la evolución futura de este a gran escala. Sin embargo, como ya se dijo en la introducción, para ser completa, una descripción del futuro del universo requiere también que se tenga en cuenta qué ocurrirá con las galaxias y las estrellas que contiene.

Naturaleza y evolución de las galaxias

Las galaxias evolucionan conforme el universo envejece: tardaron un tiempo en formarse y acabarán apagándose y desapareciendo en un futuro lejano. El tiempo que tarde en ocurrir dependerá de las interacciones entre los componentes de cada galaxia, y de ella misma con el medio intergaláctico.

No todas las galaxias son iguales: de una a otra puede haber diferencias enormes de tamaño, forma y composición. Esas diferencias se deben a la historia particular de cada una. Existen las llamadas galaxias espirales, poseedoras de brazos con forma de espiral que surgen desde un núcleo central de forma más o menos esférica, conocido como *bulbo*; galaxias elípticas, con forma de elipsoide, y, por último, galaxias irregulares, que no tienen una forma bien definida. Las galaxias espirales suelen ser grandes, con diámetros del orden de centenares de miles de años-luz. Entre las elípticas tenemos una mayor variabilidad de tamaño: la mayoría de ellas son galaxias enanas, pero las hay de tamaño intermedio e incluso galaxias elípticas gigantes, cuyas dimensiones son mayores que las de las espirales más grandes. Las galaxias irregulares deben su aspecto a estar colisionando o haber colisionado «recientemente» con otras vecinas, o a estar experimentando un periodo muy intenso de formación estelar.

Una galaxia está compuesta por estrellas, gas, polvo, materia oscura y, en muchos casos, un agujero negro central. Las proporciones relativas de los distintos componentes dependen de la historia de cada galaxia y muestran una cierta correlación con

su forma. El gas de una de ellas está constituido principalmente por hidrógeno y helio, con menor proporción de otros elementos volátiles, como el nitrógeno o el oxígeno. No todo el gas que contiene una galaxia está en el mismo estado: parte de él está muy caliente, a temperaturas de millones de grados. A esas temperaturas, los átomos de hidrógeno, que son los más abundantes en el gas, están ionizados, es decir, han perdido su electrón. Las nubes de gas en este estado reciben el nombre de *regiones H II*. En ellas el gas es muy poco denso, pudiendo haber unos 10 000 átomos o menos por metro cúbico. Otra parte del gas está más frío y es más denso: su temperatura es del orden de centenares o unos pocos miles de grados, lo que permite que los átomos de hidrógeno conserven su electrón, aunque la temperatura sigue siendo lo suficientemente alta como para que estos átomos no puedan unirse entre sí para formar moléculas. Las nubes de este gas se llaman *regiones H I* y su densidad es tal que en ellas hay del orden de millones de átomos por metro cúbico. Allí donde el gas es aún más denso y más frío sí se forman moléculas, motivo por el cual se habla de *nubes moleculares*. Aparte de la de H_2 , en una nube molecular hay otras moléculas como el monóxido de carbono (CO) o el radical hidroxilo (OH). Algunas de estas moléculas, como el radical hidroxilo, no son estables en las condiciones de la superficie terrestre: su existencia en las nubes moleculares se debe a que, aunque estas sean el tipo de nube de gas más densa de una galaxia, su densidad es mucho menor que la de la atmósfera de la Tierra. Esta baja densidad hace que sean muy poco frecuentes las colisiones entre moléculas, lo que permite que aquellas que reaccionarían rápidamente con otras por no ser estables tengan una vida media muy larga. En las nubes moleculares los elementos menos volátiles, como el silicio, forman granos de polvo. Aunque estos tienen tamaños del orden de un micrómetro o menor y solo suponen más o menos el 1% de la masa de una nube molecular, como dispersan la luz visible que les llega, hacen que estas últimas sean efectivamente opacas, impiéndonos ver en luz visible lo que hay dentro o detrás de ellas.

Las galaxias irregulares son las que por lo general tienen mayor proporción de gas frío y denso (*regiones H I* y *nubes mole-*

culares) comparado con la masa contenida en sus estrellas. En algunas de estas galaxias la masa del gas llega a ser igual a la mitad de la masa combinada de todas sus estrellas. Les siguen las galaxias espirales, donde la cantidad de gas en regiones H I y nubes moleculares llega al 5-10% de la masa de sus estrellas, mientras que en las galaxias elípticas el gas que está presente es solamente del tipo caliente y poco denso (regiones H II). Como las estrellas de una galaxia se forman a partir de las nubes moleculares, también existe una relación entre la forma de las galaxias y la edad de las estrellas que las componen. Las galaxias irregulares y las espirales cuentan con una buena proporción de estrellas jóvenes, formadas recientemente a partir del gas de la galaxia. Aquí, «recientemente» quiere decir hace unos pocos millones de años, que si bien es un intervalo de tiempo enorme comparado con una vida humana, es muy pequeño frente a la edad del universo. Las estrellas de las galaxias elípticas, por el contrario, son viejas, con edades del orden de varios miles de millones de años, comparables con la edad del universo.

La distribución de las estrellas varía de un tipo de galaxia a otro. Al fin y al cabo, la distinción entre galaxias elípticas, espirales e irregulares se debe a su aspecto cuando se las observa con luz visible, cuya fuente son precisamente las estrellas que contienen. En una galaxia elíptica, las estrellas orbitan alrededor del centro galáctico en órbitas aproximadamente circulares cuyos planos se disponen aleatoriamente ocupando todo el volumen del elipsoide de la galaxia. En las espirales las estrellas se pueden agrupar en dos grupos. Las más viejas siguen el mismo tipo de órbitas alrededor del centro galáctico que las estrellas de las galaxias elípticas, formando lo que los astrónomos llaman el halo de la galaxia espiral, que como hemos dicho tiene forma aproximadamente esférica. Las estrellas más jóvenes y algunas también bastante viejas, aunque no tanto como las del halo, giran por su parte en torno al centro de la galaxia de tal modo que los planos de sus órbitas coinciden para formar un disco alrededor de su centro. En el disco, las estrellas más jóvenes se agrupan en

Somos polvo de estrellas que piensa sobre las estrellas.

CARL SAGAN

los brazos espirales. Como las estrellas brillantes se encuentran entre las más jóvenes, los brazos espirales destacan en el disco por ser más brillantes que el resto de este. Por el mismo motivo el disco de las galaxias espirales es mucho más evidente que su halo. El disco es bastante fino; por poner un ejemplo, el de nuestra galaxia tiene un espesor de unos mil años-luz y un diámetro de unos 100 000 años-luz, es decir, el espesor del disco alcanza un 1% del diámetro, las mismas proporciones que un disco compacto.

En el centro de la mayoría de las galaxias hay un agujero negro con una masa descomunal. Por ejemplo, en el de la Vía Láctea hay uno con una masa unas cuatro millones de veces más grande que la de nuestro Sol. En otras galaxias en las que la masa del agujero negro central ha podido medirse se han encontrado algunos de masa todavía mayor, de cientos de millones de veces la masa del Sol. Aunque la masa del agujero negro central de las galaxias sea tan grande comparada con la del Sol, es pequeña comparada con la masa total de estrellas, gas y materia oscura de cada galaxia. Por ejemplo, se estima que la masa total de la Vía Láctea es de entre 600 000 y 800 000 millones de masas solares, es decir, entre 150 000 y 200 000 veces la masa del agujero negro central. Por tanto, aunque este último es una parte importante de cada galaxia y se supone que fue determinante en su formación, contiene solo una pequeña fracción de la masa galáctica. La región donde la gravedad del agujero negro central es importante comparada con la de las estrellas y el gas es solo una parte pequeña del volumen de toda la galaxia: en las espirales no se extiende más allá del bulbo.

El último componente de las galaxias es la materia oscura. Tanto en las espirales como en las elípticas, la materia oscura se distribuye de forma aproximadamente esférica, en un volumen mayor que el que ocupan sus estrellas. Esto hace que la mayor parte de la masa de una galaxia sea materia oscura: de hecho, esta es unas 10 veces mayor que la masa contenida en las estrellas y el gas de la galaxia. Como la materia oscura no puede observarse directamente, lo que sabemos sobre su distribución se ha deducido a partir de su influencia gravitatoria sobre las estrellas y el gas en cada una.

FORMACIÓN Y EVOLUCIÓN DE LAS GALAXIAS

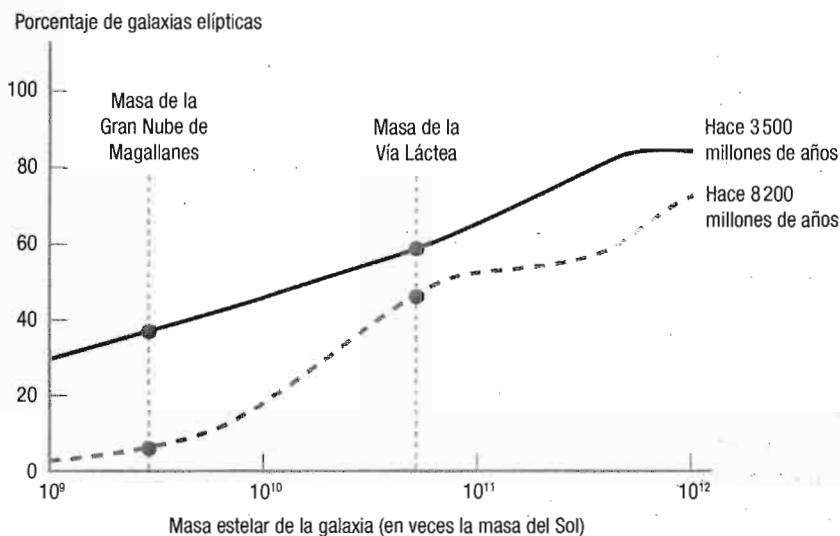
El aspecto que tienen las galaxias en la actualidad no es el mismo que tenían cuando el universo era más joven. Podemos saber cómo eran las galaxias en el pasado observando las más alejadas de nosotros, ya que cuanto mayor es la distancia a la que está un objeto, lo vemos tal como era en una época más temprana del universo. A partir de los cambios experimentados por las galaxias con el paso del tiempo, se puede aventurar qué será de ellas en el futuro.

Entre las lejanas y por tanto más antiguas, hay una mayor proporción de galaxias irregulares que entre las galaxias actuales. También el tamaño de las galaxias lejanas suele ser más pequeño que el de las actuales del mismo tipo. Los astrónomos explican estos hechos diciendo que a lo largo de la historia del universo han ido experimentando colisiones entre ellas, y como resultado de estas colisiones, las más grandes han ido creciendo a base de incorporar a las más pequeñas. En el caso de la nuestra, como ya hemos mencionado, en estos momentos está colisionando con la galaxia enana de Sagitario, y se espera que las estrellas y el gas de esa galaxia queden incorporados a la Vía Láctea. Como resultado de las fusiones entre galaxias, si pudiéramos observar un determinado volumen del universo y seguir su evolución conforme este se expande, el número de galaxias dentro de ese volumen disminuiría con el tiempo, pues ya no se forman otras nuevas.

Las colisiones entre galaxias son procesos muy lentos a escala humana, ya que suelen durar millones de años, así que nadie ha visto una en todas sus etapas. Sin embargo, en el cielo hay un buen número de galaxias que por lo próximas que se encuentran entre sí tienen que estar colisionando. Otro argumento a favor de las colisiones y uniones entre galaxias es que las mayores que existen se encuentran en el centro de los cúmulos de galaxias. Allí es precisamente donde deberían estar las más grandes si las más pequeñas del cúmulo se vieran atraídas hacia el centro por la acción de la gravedad y se mezclaran unas con las otras. Los astrónomos piensan que en un choque entre galaxias de tamaños

similares, el gas y, en el caso de que alguna de las galaxias implicadas fuera espiral, también las estrellas del disco, salen despedidos lejos del centro de la colisión, con lo que después quedará una galaxia elíptica. Otro argumento a favor de que las galaxias elípticas más grandes sean el resultado de colisiones entre galaxias de igual tamaño es que en el centro de los cúmulos, donde las colisiones deben ser relativamente frecuentes, suele haber galaxias elípticas gigantes. Además, las galaxias elípticas gigantes parecen ser muy raras entre las más lejanas. Como, a mayor distancia, más temprana es la época del universo que observamos, la falta de galaxias elípticas gigantes a grandes distancias

FIG. 1



Las galaxias elípticas eran menos frecuentes en épocas pasadas del universo. El aumento de la proporción de las galaxias elípticas para todos los tamaños de galaxias con el paso del tiempo se debe a que las colisiones entre otros tipos de galaxias (espirales e irregulares) acaban dando lugar a galaxias elípticas. La masa estelar que se menciona en el título del eje horizontal es la masa de todas las estrellas de la galaxia (la masa total de la galaxia es la masa de las estrellas más la masa del gas y la materia oscura). Como orientación, se indican en la figura las masas estelares de la Vía Láctea (una galaxia espiral barrada gigante) y la Gran Nube de Magallanes (una galaxia irregular).

es de esperar si estas se han ido formado a lo largo de la historia a partir de la fusión con otras. Por tanto, conforme el universo envejece no solamente disminuye el número de galaxias, sino que la forma que tienen estas cambia con el tiempo, desapareciendo las irregulares y espirales para formar galaxias elípticas (figura 1).

EVOLUCIÓN QUÍMICA DE UNA GALAXIA

Las galaxias se formaron en una época muy temprana de la historia del universo. La distancia a la que están las más alejadas de nosotros sugiere que ya existían cuando este tenía 1 000 millones de años de edad. Sin embargo, no todas las estrellas de una galaxia se formaron a la vez. Los astrónomos son capaces de determinar la edad de un conjunto de estrellas que se han formado simultáneamente a partir de la medida de la luminosidad de cada una y de su clase espectral. La luminosidad de cada estrella es la cantidad de energía que emite por unidad de tiempo en forma de radiación electromagnética. Si dos estrellas están a la misma distancia de nosotros, aquella con mayor luminosidad nos parecerá más brillante. La clase espectral de una estrella está relacionada con el color de la luz que nos llega de ella. Las hay que emiten luz con tonos azulados, pasando por el blanco y el amarillo hasta el anaranjado-rojizo. El color de la luz de una estrella depende de la temperatura de sus capas exteriores. La relación entre color y temperatura la vemos en un ambiente más familiar cuando calentamos en un fuego un trozo de metal o de carbón. Cuando el metal está lo suficientemente caliente, emite luz de color rojo. Si se calienta más, la luz que emite es amarilla, para pasar a blanco o blanco-azulado para temperaturas aún más altas. Al igual que para un trozo de metal en el fuego, la temperatura de las capas superficiales de las estrellas que emiten luz azulada es mayor que la de aquellas que emiten luz rojiza. La energía que emiten las estrellas procede de reacciones de fusión nuclear que tienen lugar en su interior. Cuanto mayor es la luminosidad de la estrella, mayor es el ritmo al que tienen lugar estas reaccio-

nes nucleares, pues tiene que compensar la mayor pérdida de energía que le supone emitir una mayor cantidad de radiación electromagnética. El ritmo de las reacciones de fusión nuclear depende también de la temperatura: a mayor temperatura, mayor ritmo de fusión porque son más frecuentes las colisiones entre los núcleos atómicos necesarias para que tenga lugar dicha fusión. Cuando una estrella agota los núcleos de los elementos químicos que puede fusionar en su núcleo se acaba convirtiendo en un residuo estelar: una enana blanca, una estrella de neutrones o un agujero negro. El resultado es que cuanto más luminosa y más azul es una estrella menos tiempo tarda en convertirse en un residuo estelar. Cuando los astrónomos encuentran una agrupación de estrellas que se formaron todas a la vez, pueden determinar su edad a partir de la luminosidad y la clase espectral de sus miembros. Una agrupación en la que haya estrellas muy luminosas y azules será muy joven, porque esas estrellas no han tenido tiempo de convertirse en residuos estelares. Por el contrario, una agrupación en la que solo queden estrellas poco luminosas y de luz rojiza será muy vieja, porque todas las más brillantes han desaparecido convertidas en residuos estelares.

Otra forma de determinar la edad de una estrella es a través de su contenido en elementos químicos distintos del hidrógeno y del helio o, usando el término empleado en astronomía, su *metallicidad*. Los astrónomos llaman metalicidad a la concentración de elementos químicos de peso atómico mayor que el helio, a los que se refieren con el nombre colectivo de metales aunque según sus propiedades químicas no todos ellos lo sean. Como en la composición original de la materia ordinaria del universo no había elementos de masa atómica mayores que el litio y este solo en una fracción pequeñísima, el resto de elementos químicos han sido producidos a lo largo de la historia del universo. Los agentes responsables de la formación de los elementos químicos son las estrellas.

En las reacciones de fusión nuclear que tienen lugar dentro de las estrellas, núcleos atómicos de elementos ligeros se combinan para formar núcleos de elementos más pesados. En las estrellas jóvenes los núcleos que se fusionan son núcleos de hidrógeno

para formar núcleos de helio, pero en las de más avanzada edad los núcleos de helio se pueden fusionar para formar núcleos de carbono, y en las de mayor masa, núcleos de elementos más pesados como el oxígeno o el silicio. Al final de su existencia, antes de convertirse en residuos estelares, las estrellas tienden a devolver al gas del medio interestelar una buena proporción de su materia. Esto hace que conforme pasa el tiempo este gas se vaya poco a poco enriqueciendo en elementos distintos del hidrógeno y el helio. En la actualidad, en la vecindad del Sol aproximadamente el 2% de la masa del gas está formada por elementos que no son hidrógeno o helio.

El enriquecimiento progresivo en metales del gas del que se forman hace que podamos hacernos una idea de la antigüedad de una estrella a partir de la proporción de metales en sus capas más exteriores, que no participan en los procesos de fusión nuclear que tienen lugar en su interior. Cuanto mayor es la metalicidad de una estrella, más recientemente debe haberse formado.

Combinando ambos procedimientos es posible determinar que, en el caso de nuestra galaxia, la Vía Láctea, que es una galaxia espiral, las primeras estrellas en formarse fueron las del halo, puesto que tienen una metalicidad bastante más baja que las del disco, así que se formaron a partir de un material más parecido a la materia original del universo. Además, en el halo solo quedan estrellas poco luminosas y de luz rojiza, que son las que tienen una vida más larga: las estrellas más luminosas y azules del halo hace ya mucho tiempo que se convirtieron en residuos estelares. Por muy viejas que sean las estrellas del halo de nuestra galaxia, siempre contienen cierta cantidad de elementos más pesados que el hidrógeno y el helio. Lo mismo sucede en las galaxias que están lo suficientemente próximas como para poder distinguir en ellas estrellas individuales: no hay en ellas estrellas compuestas únicamente por hidrógeno y helio. Esto significa que, aunque viejas, las del halo de nuestra galaxia no son las primeras que se formaron en el universo. Se supone que las primeras estrellas eran muy masivas y que sus vidas terminaron hace mucho tiempo. Al morir, muchas de estas estallaron, enriqueciendo el medio interestelar con los elementos químicos

sintetizados en su interior. Por eso todas las que podemos observar en la actualidad tienen cierta cantidad de «metales».

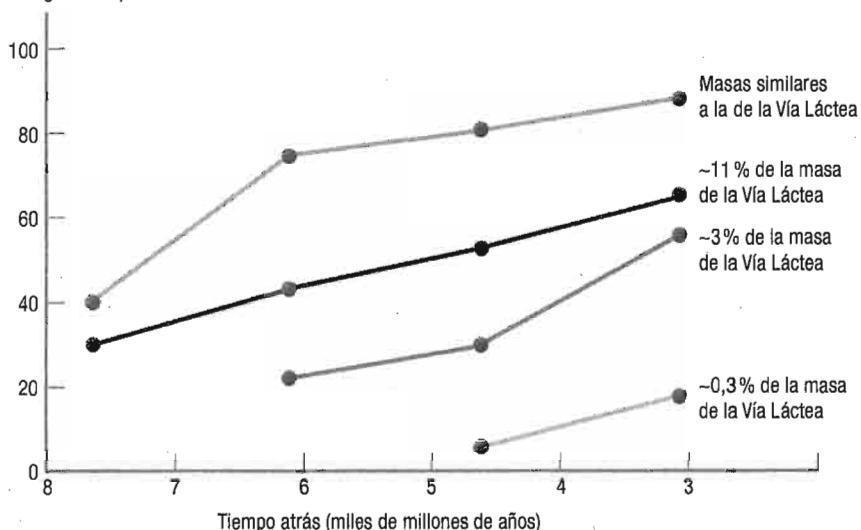
Aun entre las estrellas del disco se observan diferencias en su composición: las más cercanas al centro del disco tienen mayor metalicidad que las más distantes del centro. Como los elementos químicos más pesados se producen en el interior de las estrellas, esto significa que el ritmo al que se forman es mayor en las zonas centrales de la galaxia y que la materia cercana al centro galáctico ha pasado por más ciclos de formación estelar que la materia en su periferia. Con la composición química de las estrellas del disco también pasa otra cosa interesante: la de las estrellas más jóvenes que se conocen en nuestra región es similar a la composición química de nuestro Sol. Pero esas estrellas jóvenes tienen solo unos pocos millones de años de edad, mientras que el Sol tiene unos 5 000 millones de años. Esta semejanza de composición sugiere que la evolución química de nuestra galaxia no ha progresado siempre al mismo ritmo, sino que era mucho más rápida en épocas pasadas que en la actualidad. En efecto, el cambio de ritmo en la evolución química se puede explicar si en el pasado las estrellas se formaban en nuestra galaxia a un ritmo mayor que el actual. Los astrónomos llaman *tasa de formación estelar* al ritmo de producción de estrellas de una galaxia.

CAMBIOS EN LA TASA DE FORMACIÓN ESTELAR

La tasa de formación estelar no es la misma en todas las galaxias. Como las estrellas se forman a partir del gas de las nubes moleculares que existan dentro de ellas, aquellas con mayor cantidad de este gas son las que pueden formar estrellas a un ritmo mayor. Las galaxias espirales (figura 2) y las irregulares son las que tienen mayor proporción de gas en nubes moleculares, así que en ellas la tasa de formación estelar es mayor que en las galaxias elípticas gigantes, en las que el poco gas que existe es caliente y poco denso. Debido a que la tasa de formación estelar cambia de una galaxia a otra, para estudiar su evolución a lo largo de la historia del universo los astrónomos necesitan promediar su valor

FIG. 2

Porcentaje de galaxias espirales entre las galaxias que forman estrellas



La proporción de galaxias espirales entre las galaxias en las que se da formación estelar aumenta con el tiempo. Para que el gas de una galaxia se asiente en un disco no debe haber fenómenos que lo perturben como, entre otros: colisiones entre galaxias, aportes de gas extragaláctico o brotes intensos de formación estelar. La tendencia hacia el aumento de la frecuencia de las galaxias espirales indica que estos fenómenos se han ido haciendo menos habituales.

sobre volúmenes muy grandes de este, del orden de millones de años-luz, de modo que cada volumen contenga muchas galaxias y se compensen las variaciones de una a otra.

La historia de la tasa de formación estelar que se deduce de tales estudios nos dice que el ritmo al que se forman estrellas alcanzó su valor máximo cuando el universo tenía solo unos pocos miles de millones de años de edad y ha ido disminuyendo paulatinamente desde entonces (figura 3). La disminución de la tasa de formación estelar se debe a que poco a poco las galaxias consumen el gas a partir del cual pueden formarse las estrellas y a que con el paso del tiempo cada vez son menos frecuentes

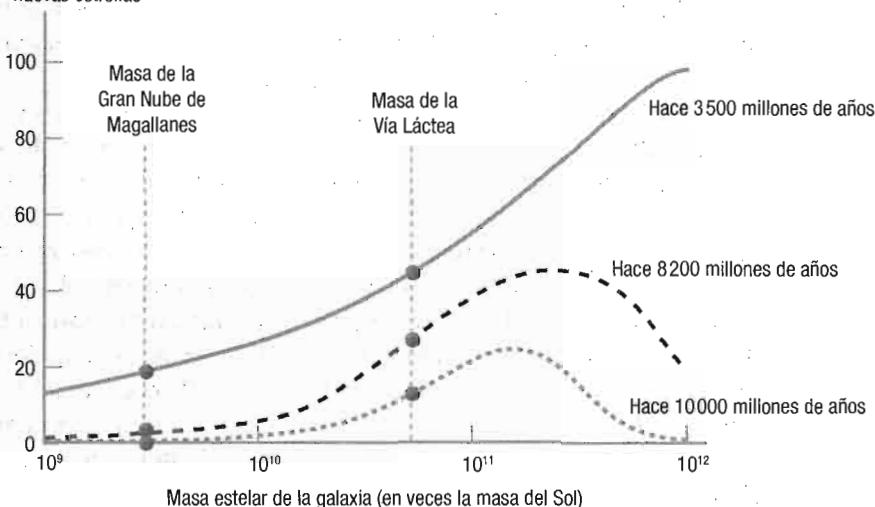
las colisiones o las aproximaciones entre galaxias vecinas. Una colisión o aproximación suele provocar el nacimiento de estrellas en las galaxias involucradas pues el gas que contienen se ve comprimido por efecto del choque. Como resultado de esta compresión, las regiones donde el gas se hace más denso pueden colapsar bajo su propia gravedad y formar estrellas.

Como la proporción de gas varía de una galaxia a otra y el número de colisiones experimentado por ellas depende de su propia historia, la edad media de las estrellas y el ritmo al que las forman varían también mucho entre las diferentes galaxias en el universo actual. Por ejemplo, se calcula que en la nuestra una cantidad de gas equivalente a unas tres veces la masa del Sol se transforma en estrellas cada año, mientras que en la Gran Nube de Magallanes, una galaxia satélite de la Vía Láctea, se convierte anualmente en estrellas una masa de gas de 0,2 veces la del Sol. Esto puede parecer poco si se compara con el valor dado para la Vía Láctea, pero si tenemos en cuenta que la masa de la Gran Nube de Magallanes es solo una centésima parte de la de la Vía Láctea, resulta que en aquella se forman estrellas a un ritmo unas diez veces mayor que en esta última. Esta diferencia de ritmo se debe a que la Gran Nube de Magallanes es proporcionalmente mucho más rica en gas que la Vía Láctea.

Puesto que una galaxia solo puede formar nuevas estrellas mientras tiene gas disponible para ello, conociendo el contenido total de gas de la Vía Láctea se puede saber hasta cuándo podrá seguir formando estrellas si se mantiene el ritmo actual. Se estima que la masa de todo el gas en la Vía Láctea equivale aproximadamente a entre 4 000 y 6 000 millones de veces la masa del Sol. A un ritmo de tres masas solares al año, la Vía Láctea puede seguir formando estrellas durante los próximos 1 300 a 2 000 millones de años. En realidad, esta estimación se queda corta porque la tasa de formación estelar va disminuyendo con el tiempo conforme se va agotando el gas, y también porque hemos supuesto que nuestra galaxia no recibe aportes exteriores de este material. Esta última suposición no es cierta: la Vía Láctea incorpora gas del *medio intergaláctico* a un ritmo que va de 0,2 a 1 masa solar al año. Este gas tiene una metalicidad menor

FIG. 3

Porcentaje de galaxias que no forman nuevas estrellas

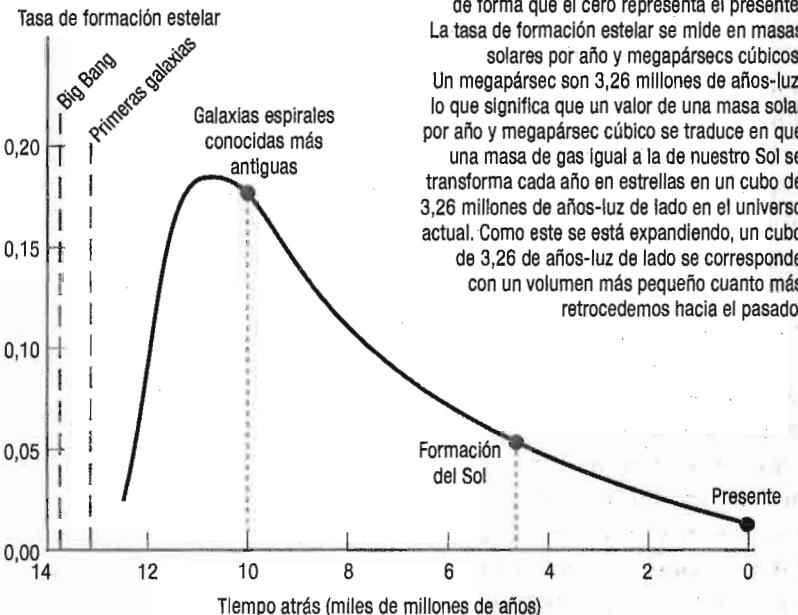


El porcentaje de galaxias que ya no forman nuevas estrellas ha aumentado paulatinamente conforme el universo envejece y hay más galaxias que agotan su gas por haber formado estrellas con él o por haberlo perdido en el medio intergaláctico. En el universo actual, la mayor parte de la formación estelar tiene lugar en las galaxias más pequeñas, que son proporcionalmente más ricas en gas que las galaxias más grandes. La masa estelar que se menciona en la leyenda del eje horizontal es la masa de todas las estrellas de la galaxia (la masa total de la galaxia es la masa de las estrellas más la masa del gas y la materia oscura).

que el de nuestra galaxia, pues apenas se ha visto involucrado en la formación de estrellas. Los aportes de gas extragaláctico y la disminución paulatina de la tasa de formación estelar son los responsables de que el porcentaje de elementos más pesados que el helio no haya aumentado mucho en la Vía Láctea desde la formación del Sol hace 5 000 millones de años. Este aporte continuo de gas retrasa el final de la formación de nuevas estrellas en nuestra galaxia, aunque es de esperar que dichos aportes disminuyan con el tiempo conforme se consume también el gas extragaláctico. No podemos estar seguros de la evolución futura de los aportes de gas extragaláctico porque en la actualidad sabe-

EVOLUCIÓN DE LA TASA DE FORMACIÓN ESTELAR

El ritmo al que se forman las estrellas, la llamada tasa de formación estelar, ha ido cambiando a lo largo de la historia del universo, como se muestra en la figura. Para medir la tasa de formación estelar en el pasado se usa la relación entre distancia, edad cosmológica y desplazamiento al rojo. Cuanto mayor es el desplazamiento al rojo de una galaxia, más alejada está de nosotros y más tiempo ha tenido que viajar su luz para llegar hasta aquí, así que la vemos tal como era en una época más temprana del universo. De esta forma, observando galaxias muy lejanas se puede saber el ritmo al que se formaban las estrellas cuando el universo era más joven. En galaxias tan lejanas no pueden distinguirse estrellas individuales. La cantidad de estrellas jóvenes recién formadas se estima de forma indirecta a partir de la luz que nos llega de cada galaxia. Un procedimiento se basa en que las estrellas jóvenes emiten principalmente en el ultravioleta, con lo cual se puede saber la proporción de estas estrellas en una galaxia comparando la cantidad de luz que emite en esta longitud de onda con la cantidad emitida en luz visible e infrarroja. A partir de este tipo de medidas se ha determinado que la tasa de formación estelar creció hasta alcanzar su valor máximo cuando el universo tenía unos 2000 millones de años de edad, y desde entonces no ha dejado de disminuir.



mos muy poco de su distribución entre las galaxias y su dinámica. Otro factor que retrasa el envejecimiento de nuestra galaxia es que no toda la materia que forma una estrella se pierde para siempre. Cuando una estrella con una masa de hasta ocho veces la del Sol agota el combustible para las reacciones nucleares, se expande y sus capas exteriores se acaban desprendiendo de su núcleo para formar una nebulosa planetaria, mientras que el citado núcleo acaba formando una enana blanca. Las estrellas más masivas terminan su vida explotando como supernovas y devolviendo al medio interestelar la mayor parte de su masa; incluso en el caso de las supernovas más violentas el material expulsado puede escapar de nuestra galaxia y volver a mezclarse con el gas intergaláctico. En conjunto, se estima que en promedio una estrella devuelve un quinto de su masa al medio interestelar al final de su existencia. Para la Vía Láctea, estos fenómenos suponen un aporte de gas del orden de una masa solar al año. Este gas devuelto por las estrellas es muy importante, pues está enriquecido con carbono y otros elementos químicos más pesados, que son imprescindibles para formar planetas rocosos como la Tierra y en algunos de ellos quizás formar vida. Si se tienen en cuenta los aportes de gas extragaláctico y el ciclo de la materia en la galaxia, resulta que la nuestra solo gasta de forma neta de 1 a 1,8 masas solares de gas al año, lo que da para un tiempo máximo de unos 6 000 millones de años produciendo nuevas estrellas, si se mantienen los ritmos actuales.

En el caso de otras galaxias, la situación puede ser muy diferente de la de la Vía Láctea, pues el contenido de gas puede variar mucho de una a otra. Por ejemplo, como ya se ha comentado, las Nubes de Magallanes son proporcionalmente más ricas en gas que la Vía Láctea y en ellas nacen estrellas a mayor ritmo que en esta última, mientras que en las galaxias elípticas gigantes la formación de estrellas prácticamente ha cesado. En cuanto a los aportes de gas intergaláctico a galaxias distintas de la nuestra se sabe más bien poco, aunque es de suponer que debe variar bastante dependiendo del entorno particular de cada una. En cualquier caso, más tarde o más temprano el destino final de todas las galaxias es pues agotar su gas y dejar de producir

nuevas estrellas. No se puede decir con exactitud cuánto tiempo tardará en ocurrir esto para todas las galaxias del universo, pero tomando la Vía Láctea como ejemplo se puede suponer que será en un tiempo del orden de unas pocas decenas de miles de millones de años.

EL AGUJERO NEGRO CENTRAL DE LAS GALAXIAS

Hasta ahora hemos hablado poco del agujero negro central que existe en la mayoría de las galaxias. Los agujeros negros son los objetos del universo que poseen una mayor gravedad, tanta que ni la luz puede escapar de su interior. Teniendo una gravedad tan intensa, es razonable preguntarse si con el paso del tiempo toda la materia de una galaxia no acabará siendo engullida por su agujero negro central. De hecho, tanto en nuestra galaxia como en otras hay evidencia de que el agujero negro central recibe un aporte más o menos continuo de materia. En el caso del de la Vía Láctea es posible resolver con radiotelescopios el movimiento del gas a su alrededor. Antes de caer en el interior del agujero negro, el gas da vueltas de una forma parecida a la manera en que el agua gira alrededor del sumidero de una bañera. Pero a diferencia del remolino de agua de un sumidero, el gas que orbita alrededor de un agujero negro se mueve a velocidades relativistas antes de caer en él, es decir, a velocidades próximas a la de la luz. La causa de tan altas velocidades es precisamente la gravedad tan intensa del agujero negro: el gas, al caer desde una distancia alejada de él, va siendo acelerado por su gravedad de la misma manera que una piedra que se deja caer acelera debido a la gravedad de la Tierra, con la diferencia de que la de un agujero negro es muchísimo mayor que la de la Tierra y por tanto la aceleración que provoca en el gas es muchísimo mayor. El rozamiento entre capas adyacentes de gas a velocidades tan altas provoca que el que gira alrededor del agujero negro se caliente a temperaturas altísimas, tanto que llega a emitir rayos X. El gas más apartado del agujero negro está menos caliente y emite en otras regiones del espectro electromagnético, desde el ultravioleta.

leta hasta el infrarrojo. Es gracias a esta radiación electromagnética del gas caliente a su alrededor que podemos detectar el agujero negro central de nuestra galaxia y el de otras.

A pesar de su gravedad tan intensa, el de la Vía Láctea solo engulle cada año una masa de gas equivalente a una milésima de masa solar. Como ya hemos dicho, la masa de todo el gas de nuestra galaxia equivale a entre 4000 y 6000 millones de veces la masa del Sol, y la masa de todas sus estrellas es unas diez veces mayor que la de dicho gas. Si el ritmo al que nuestro agujero negro central engulle gas se mantiene en el futuro, solo una fracción muy pequeña de la masa total de las estrellas y el gas de la galaxia será incorporada por él antes de que todo el gas galáctico se haya convertido en estrellas y se detenga la formación estelar en la Vía Láctea.

Al igual que la tasa de formación estelar varía mucho de una galaxia a otra, el ritmo al que el agujero negro central de las galaxias engulle gas varía bastante de unas a otras. Entre las cercanas a la nuestra, se supone que en la mayoría dicho agujero negro tiene un comportamiento parecido al de nuestra galaxia. Sin embargo, algunas de las galaxias relativamente cercanas a la nuestra muestran lo que se llama en astronomía *núcleos galácticos activos*, que no es otra cosa que una actividad inusual en el centro galáctico (véase la imagen de las págs. 64-65). Esta actividad inusual tiene la forma de una emisión de rayos X, ultravioleta y visible, acompañada en ocasiones por una emisión de ondas de radio desde un par de chorros de gas ionizado que parte del centro de la galaxia y cuya extensión espacial puede llegar a ser muchas veces el diámetro galáctico. En las galaxias con un núcleo activo, o para abreviar, *galaxias activas*, se supone que el agujero negro central está engullendo materia a un ritmo mucho mayor que en una normal como la nuestra. Para explicar la luminosidad del núcleo de las galaxias activas cercanas a nosotros, es necesario suponer que su agujero negro central consume del orden de una décima de masa solar al año: aunque el ritmo es mayor que en la Vía Láctea, comparado con

No es otra cosa sino una masa de innumerables estrellas reunidas en cúmulos.

GALILEO GALILEI, EN REFERENCIA A LA VÍA LÁCTEA





Imagen, modificada artísticamente, de Arp 220, una galaxia con núcleo activo. Los núcleos activos tienen como « motores » a agujeros negros muy masivos. En las inmediaciones de un agujero negro de este tipo, se generan dos extensos chorros de materia en direcciones opuestas, como los mostrados en la imagen.

la masa total de las estrellas y el gas de una galaxia sigue siendo modesto. Por tanto, no es de esperar que ninguna de las compañeras cercanas a la Vía Láctea acabe siendo tragada por su agujero negro central. Es más, la proporción de galaxias activas con respecto a las galaxias normales aumenta con la distancia a nosotros, y las galaxias activas más extremas, en las que la luminosidad del núcleo sobrepasa a la de toda la galaxia que lo contiene, se encuentran solo entre las más alejadas de nosotros. Tanta es la distancia que nos separa de ellas que por un tiempo se las conocía como objetos cuasiestelares o cuásares (*quásares*), porque tal es la luminosidad del núcleo de estas galaxias y tan pequeño su tamaño aparente que en las primeras imágenes que se obtuvieron de ellas el brillo del núcleo ocultaba la imagen del cuerpo galáctico.

El decrecimiento en la proporción de galaxias activas con la edad del universo parece sugerir que el ritmo de consumo de materia por su agujero negro central ha ido disminuyendo con el tiempo, como debe ser si las galaxias poco a poco consumen el gas que tienen disponible para formar estrellas. Parece poco probable pues que ninguna acabe su existencia siendo tragada por su agujero negro central. Antes bien, las investigaciones más recientes sobre el efecto de este en la evolución de sus galaxias sugieren qué, en los casos más extremos de actividad, el efecto es el contrario. Cuando dicho agujero negro central engulle materia a un ritmo muy elevado, la radiación electromagnética emitida por el gas que orbita en torno antes de caer en él es capaz de calentar el resto de la galaxia, expulsándolo de ella y acabando con la formación estelar. Esto es lo que se supone que ha ocurrido con las galaxias elípticas gigantes, donde la formación de estrellas se paró hace tiempo. Como ya dijimos, una galaxia elíptica gigante se forma a partir de la fusión y colisión de galaxias del mismo tamaño. Muy probablemente en estas colisiones se produce la unión entre los agujeros negros centrales de las galaxias que se fusionan y grandes cantidades de gas caen en el resultante nuevo agujero negro central. El resto del gas es calentado por el que cae hacia él y la mayor parte de este escapa de la galaxia elíptica gigante, cesando la formación estelar.

En cuanto al resto de las galaxias, se supone que su agujero negro central continuará incorporando materia a un ritmo cada vez más pausado y, siempre que su anfitriona no experimente colisiones con otras galaxias o aportes extraordinarios de gas, poco a poco el suyo se irá consumiendo en la formación de estrellas hasta que todas las galaxias se conviertan en sistemas formados por estrellas viejas. Una vez que cese la formación estelar, la evolución de las galaxias vendrá determinada por la duración de las últimas estrellas que se hayan formado en ellas.

La vida de las estrellas

Una vez que una galaxia agota su gas disponible, deja de formar estrellas. A partir de entonces, su evolución depende del tiempo que estas puedan brillar y de cómo acaben su existencia. Ambas cosas pueden variar espectacularmente de una estrella a otra debido a su enorme variedad entre el fantástico número presente en el universo.

A lo largo de la existencia de una estrella la gravedad y la presión en cada punto de la misma deben compensarse. La gravedad tiende a comprimir el gas que la compone, mientras que la presión tiende a expandirlo. En cualquier punto dentro de la estrella la presión que existe debe equilibrar el peso de las capas de gas que estén por encima de dicho lugar. Si la presión es mayor que el peso, empujará hacia el exterior las capas superiores, con lo que el radio de la estrella aumentará. Si, por el contrario, en algún punto la presión no alcanza a soportar el peso de tales capas, el gas allí se contraerá y estas colapsarán, lo que hará disminuir el radio de la estrella. Durante la existencia de una estrella, existen mecanismos de retroalimentación que hacen que esos cambios en su radio sean temporales y se vuelva a una situación de equilibrio, aunque en algunas estrellas, como las cefeidas, los cambios de radio se producen de forma cíclica.

La presión que ejerce un gas depende de la temperatura. Esta dependencia la podemos comprobar en casa con un sencillo experimento. Si llenamos un globo de aire y lo guardamos por unos días, se desinflará parcialmente porque parte del que contenía se escapará de su interior. Si el globo parcialmente desinflado es

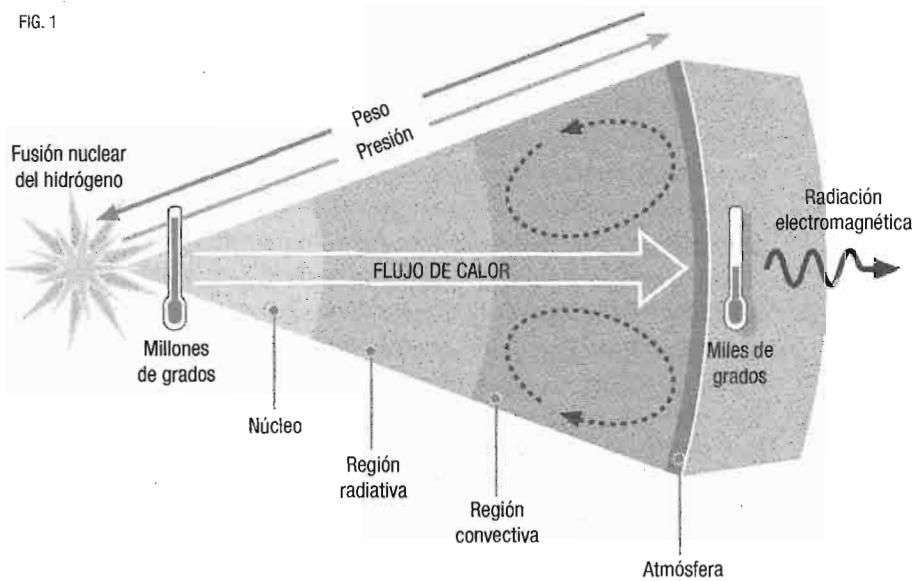
puesto al sol por un tiempo, volverá a parecer inflado. La causa es que el aire que quedaba dentro se ha calentado más que el aire exterior al globo, que está circulando. Al tener una mayor temperatura, ese aire del interior ejerce mayor presión que el de fuera. El exceso de presión dentro del globo empuja hacia afuera la goma, haciéndola estirarse. La tensión elástica de la goma es la que contrarresta el exceso de presión del aire del interior del globo. La temperatura del gas de una estrella es muchísimo mayor que la del aire del globo, pero la relación entre presión y temperatura es la misma: a mayor temperatura, mayor presión.

La presión que soporta el gas de una estrella aumenta hacia su centro, pues cuanto más próxima está una región estelar respecto a él, mayor es el peso de todas las capas de gas que están por encima de ella hasta el exterior. En consecuencia, la temperatura del gas de una estrella debe aumentar desde su superficie hasta su centro. Cuanto mayor es la temperatura de un cuerpo, más calor contiene. Ahora bien, cuando existe una diferencia de temperatura entre dos puntos de un mismo cuerpo, como entre el centro y la superficie de la estrella, el calor fluye de las regiones más calientes a las más frías. Así que en una estrella el calor fluye desde el centro hasta la superficie. Esta última está tan caliente, a varios miles de grados, que emite radiación ultravioleta, luz visible y radiación infrarroja, en proporciones que dependen del valor exacto de la temperatura de la estrella.

El calor es una forma de energía, al igual que la radiación electromagnética. El transporte de calor desde el centro de la estrella hasta su superficie y la emisión de radiación electromagnética en ella significan que el astro está perdiendo energía continuamente. Dentro de él debe haber un mecanismo que produzca la energía que pierde al radiar luz o, en caso contrario, su gas se irá enfriando paulatinamente, la presión de este disminuirá y poco a poco la estrella se contraerá sobre sí misma y se apagará. El mecanismo que produce energía dentro de una estrella es la fusión nuclear, que consiste en la unión de núcleos atómicos ligeros para formar núcleos más pesados (figura 1).

El gas de una estrella joven está formado casi en su totalidad por hidrógeno y helio. Las temperaturas en su interior son tan al-

FIG. 1



La fusión del hidrógeno en una estrella ocurre solo en su núcleo, donde la temperatura alcanza millones de grados. Como la atmósfera de una estrella está a miles de grados, el calor fluye desde el núcleo hasta la atmósfera. En cada punto del interior de la estrella, la presión del gas caliente ha de equilibrar el peso de las capas situadas más hacia el exterior. La atmósfera de la estrella es transparente a la radiación electromagnética, con lo que esta es emitida desde la atmósfera llevándose consigo la energía que se produce en el núcleo. Entre el núcleo y la atmósfera existe una región radiativa, donde no hay mezcla vertical entre capas de gas, y otra convectiva, dentro de la cual hay movimientos verticales que mezclan el gas. La profundidad de estas capas depende de la masa y la edad de la estrella.

tas, desde los miles de grados de la superficie hasta los millones de grados en su centro, que el hidrógeno y el helio están ionizados, es decir, han perdido sus electrones, con lo que en realidad el gas está formado por núcleos de hidrógeno y helio entre los que los electrones se mueven sin pertenecer a ningún átomo en concreto. Los núcleos atómicos están formados por dos tipos de partículas subatómicas: protones y neutrones. Ambos tienen masas parecidas, pero se diferencian en que los protones tienen carga eléctrica positiva mientras que los neutrones no tienen carga eléctrica. Elementos químicos diferentes tienen distinto número de protones en su núcleo. Por ejemplo, todos los nú-

cleos de hidrógeno tienen un solo protón, mientras que todos los núcleos de helio tienen dos protones. Aunque todos los núcleos de un mismo elemento químico tengan el mismo número de protones, pueden tener diferente número de neutrones. A los núcleos con el mismo número de protones pero distinto número de neutrones se les llama *isótopos* diferentes del mismo elemento químico. Los dos isótopos más comunes del hidrógeno son el protio, cuyo núcleo cuenta con un solo protón y ningún neutrón,

y el deuterio, con un protón y un neutrón. Para el helio, los isótopos más comunes son el helio-3, con dos protones y un neutrón, y el helio-4, con dos protones y dos neutrones.

**En realidad no sabemos nada,
porque la verdad reside en un
abismo.**

DEMÓCRITO

ción de una fuerza que se llama *interacción nuclear fuerte*. Sin la acción de esta fuerza, por poner un ejemplo, los dos protones de un núcleo de helio saldrían disparados en direcciones opuestas, ya que ambos tienen carga eléctrica positiva y cargas eléctricas del mismo signo se repelen. La interacción nuclear fuerte entre partículas subatómicas, ya sean protones o neutrones, es atractiva, y a distancias comparables a las de un núcleo atómico (10^{-15} metros) es mucho más intensa que la interacción electromagnética, que es la responsable de la fuerza entre cargas eléctricas. Pero hay una diferencia fundamental entre la interacción nuclear fuerte y la interacción electromagnética: mientras que la interacción electromagnética tiene un alcance infinito, como lo prueba el hecho de que podamos recibir luz de objetos que distan de nosotros miles de millones de años-luz, la interacción nuclear fuerte tiene un alcance finito, del orden del tamaño de un núcleo atómico, de modo que su efecto es nulo entre protones o neutrones que estén separados entre sí a distancias mayores que unas pocas veces 10^{-15} metros.

La situación de los protones y los neutrones en un núcleo atómico es comparable a la de unas canicas que estén en un hoyo profundo de un diámetro solo algo mayor que el de ellas mismas: estas estarán muy apretadas, pero son incapaces de salir por sí

solas. Para sacar una canica del hoyo hay que proporcionarle energía para vencer la atracción gravitatoria entre ella y la Tierra, que la mantiene dentro del agujero. De manera parecida, para sacar un protón o un neutrón de un núcleo atómico hay que proporcionarles energía para vencer la atracción entre ellos debida a la interacción nuclear fuerte. Si hacemos el proceso contrario, es decir, si echamos una canica en el hoyo o añadimos un protón o un neutrón a un núcleo, se liberará energía. Pero aquí hay una diferencia entre las canicas y el hoyo y el núcleo atómico. Mientras que una canica puede rodar libremente en línea recta hasta el borde del hoyo para caer junto a sus compañeras que ya están en él, un protón no puede moverse libremente hasta alcanzar un núcleo atómico porque la repulsión entre su carga eléctrica positiva y las cargas positivas de los otros protones que estén en el núcleo tiende a desviar al protón incidente de su trayectoria para alejarlo de este último. Solo un protón que tenga una energía cinética lo bastante grande o, en otras palabras, que se mueva lo bastante rápido, puede vencer la repulsión entre su carga eléctrica positiva y las cargas positivas de los otros protones del núcleo como para acercarse lo suficiente y entrar en el rango de acción de la interacción nuclear fuerte y que esta lo capture en el núcleo. Volviendo al símil de las canicas y el hoyo, sería como si el núcleo fuera un hoyo de minigolf que está en pendiente: si lanzamos la bola de golf con poca energía, no alcanzará el hoyo y volverá a caer. Lo que acabamos de explicar para un protón que se incorpore a un núcleo vale también para núcleos de deuterio, helio u otros elementos ligeros: en todos ellos hay carga positiva. Obviamente, para un neutrón la situación es diferente porque los neutrones no tienen carga eléctrica. Sin embargo, los neutrones solitarios son inestables y en cuestión de minutos se convierten en protones, liberando un electrón y un antineutrino. Esto hace que en el interior de una estrella no haya neutrones solitarios.

La energía cinética de los núcleos de hidrógeno y helio en el gas del interior de una estrella depende de la temperatura. Cuanto mayor es la temperatura, más rápidamente se mueven los núcleos atómicos y electrones que componen el gas y mayor es su energía cinética. Tan grande es la energía cinética que tienen

que tener dos núcleos atómicos para superar la repulsión de sus cargas eléctricas positivas que las reacciones de fusión nuclear solo se producen cuando la temperatura es de varios millones de grados. Tales temperaturas se alcanzan tan solo en la región central de las estrellas. A su vez, el tipo de núcleos que una estrella es capaz de fusionar depende de la temperatura: por ejemplo, para que dos núcleos de hidrógeno se fusionen hay que superar la repulsión eléctrica entre dos protones, uno por cada núcleo de hidrógeno, mientras que para fusionar dos núcleos de helio hay que vencer la repulsión eléctrica entre los dos protones de un núcleo de helio por un lado y los otros dos protones del otro núcleo de helio por el otro. El resultado es que la repulsión eléctrica entre núcleos de helio es más intensa que la repulsión eléctrica entre núcleos de hidrógeno. Esto hace que mientras que la fusión de núcleos de hidrógeno se inicia a temperaturas de unos cuatro millones de grados, la fusión de núcleos de helio requiere de temperaturas de unos cien millones de grados. En realidad, parte de este aumento tan grande de temperatura se debe a que la fusión del helio-4 (el isótopo más común del helio) es un poco más complicada que la del hidrógeno porque el resultado de la fusión de dos núcleos de helio-4 es un núcleo inestable de berilio-8, que vuelve a desintegrarse en dos núcleos de helio-4 si en un breve espacio de tiempo desde su formación (del orden de $7 \cdot 10^{-17}$ segundos) no se fusiona con otro núcleo de helio-4 para formar carbono-12. Las altas temperaturas son necesarias para asegurar que las colisiones entre núcleos se produzcan con frecuencia suficiente como para que el tercer núcleo de helio se fusione con el berilio-8 antes de que este se desintegre.

La diferencia entre las temperaturas requeridas para la fusión del hidrógeno y la del helio tiene una consecuencia: mientras en el núcleo de una estrella exista hidrógeno, la fusión nuclear se produce solo entre núcleos de este elemento. Las estrellas recurren al helio para sostener las reacciones de fusión una vez que se ha acabado el hidrógeno disponible en el núcleo y se reúnen otras condiciones que hacen posible las elevadas temperaturas necesarias para la fusión del helio. Las estrellas que fusionan hidrógeno en su núcleo tienen unas características diferentes de

FIG. 2

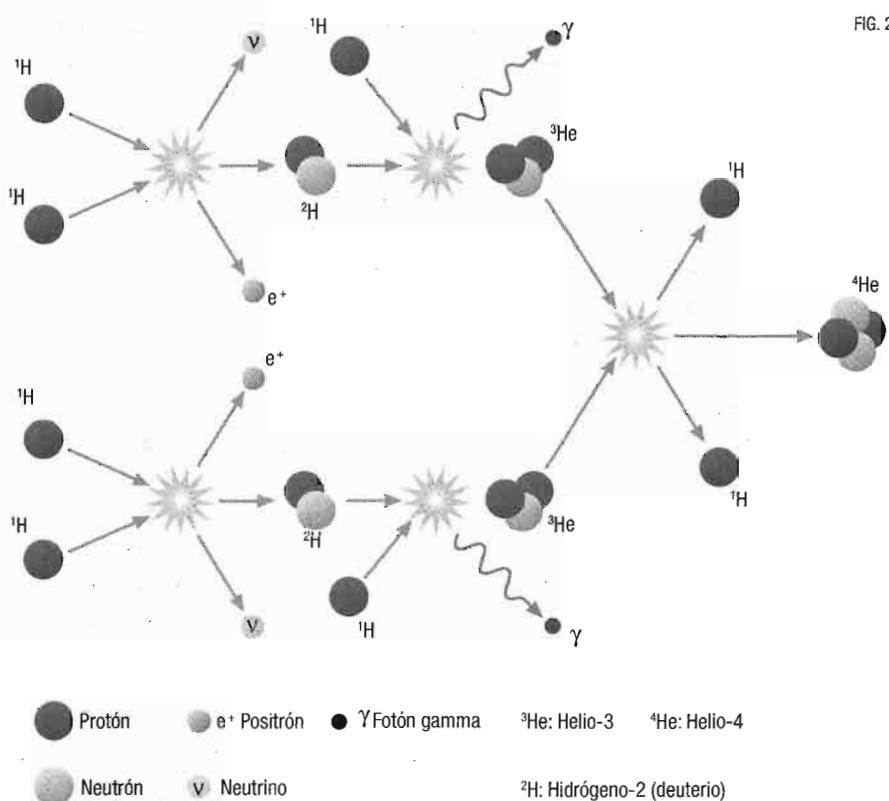


Diagrama de las reacciones nucleares en la cadena protón-protón. Estas reacciones nucleares son el mecanismo principal por el que el hidrógeno se fusiona para formar helio en las estrellas de baja masa. Los protones son núcleos de hidrógeno-1 o protio (^1H).

las de aquellas que fusionan helio u otros elementos aún más pesados. En particular, la etapa en la que una estrella fusiona hidrógeno supone la mayor parte de su existencia.

El proceso por el cual se produce la fusión del hidrógeno para formar helio depende de la masa de la estrella. Las estrellas de menor masa fusionan el hidrógeno mediante una cadena de reacciones llamada *cadena protón-protón* (figura 2). En un primer paso, dos protones, es decir dos núcleos del isótopo más

ligero del hidrógeno, se unen tras colisionar para formar un núcleo de deuterio. Este paso es muy inusual, pues necesita que uno de los dos protones que colisionan se transforme en un neutrón, emitiendo también un positrón y un neutrino, antes de que la repulsión eléctrica vuelva a separar los dos protones. Ello se debe a que la transformación de un protón en un neutrón es un proceso ocasionado por la interacción nuclear débil, cuyo alcance es aproximadamente del 0,1% del diámetro de un protón, mientras que la repulsión eléctrica es de alcance infinito. Además, ni siquiera a las temperaturas que existen en el interior del Sol la energía cinética de los protones es suficiente para superar la repulsión electrostática entre ellos: los protones se «escabullen» bajo la barrera de potencial electrostático por efecto túnel cuántico. Para hacernos una idea, el tiempo que tarda en promedio un protón en el interior del Sol en conseguir fusionarse con otro protón es del orden de 4 000 millones de años. Naturalmente, no habrá que esperar tanto tiempo para que se inicien las reacciones de fusión nuclear dentro de una estrella: debido al elevadísimo número de protones, por pura estadística, siempre habrá muchos de ellos fusionándose. En el siguiente paso otro protón se une por colisión al núcleo de deuterio para formar helio-3, y por último dos núcleos de helio-3 se fusionan para formar un núcleo de helio-4 más dos protones que vuelven a quedar libres. En el siguiente paso otro protón se une por colisión al núcleo de deuterio para formar helio-3, y por último dos núcleos de helio-3 se fusionan para formar un núcleo de helio-4 más dos protones que vuelven a quedar libres.

Sin embargo, en las estrellas de masa superior a unas dos masas solares tiene lugar una secuencia de reacciones diferentes, llamada *ciclo del CNO* (carbono-nitrógeno-oxígeno), gracias a que el núcleo de estas estrellas está a una temperatura más elevada que el de las de menor masa. En el ciclo CNO (figura 3) los protones se van incorporando de uno en uno a núcleos más pesados, partiendo del carbono-12 (6 protones y 6 neutrones) hasta el nitrógeno-15 (7 protones y 8 neutrones), hasta que la incorporación de un protón adicional hace que el nitrógeno-15 se descomponga en carbono-12 y helio-4, volviendo al punto de

FIG. 3

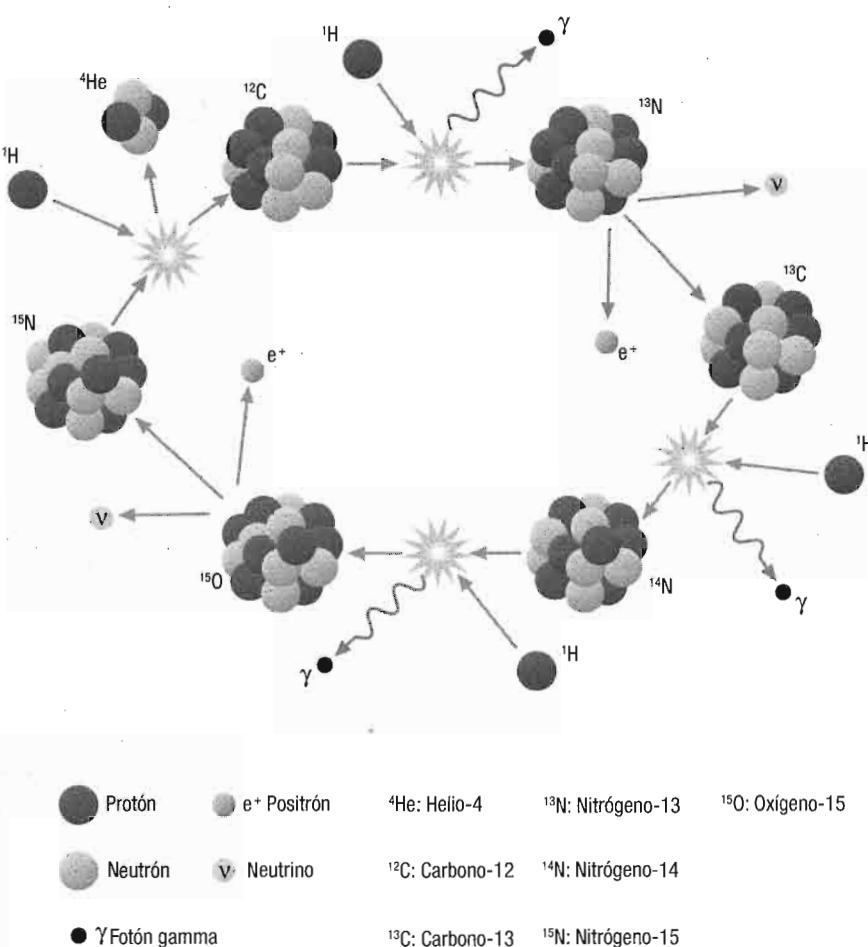
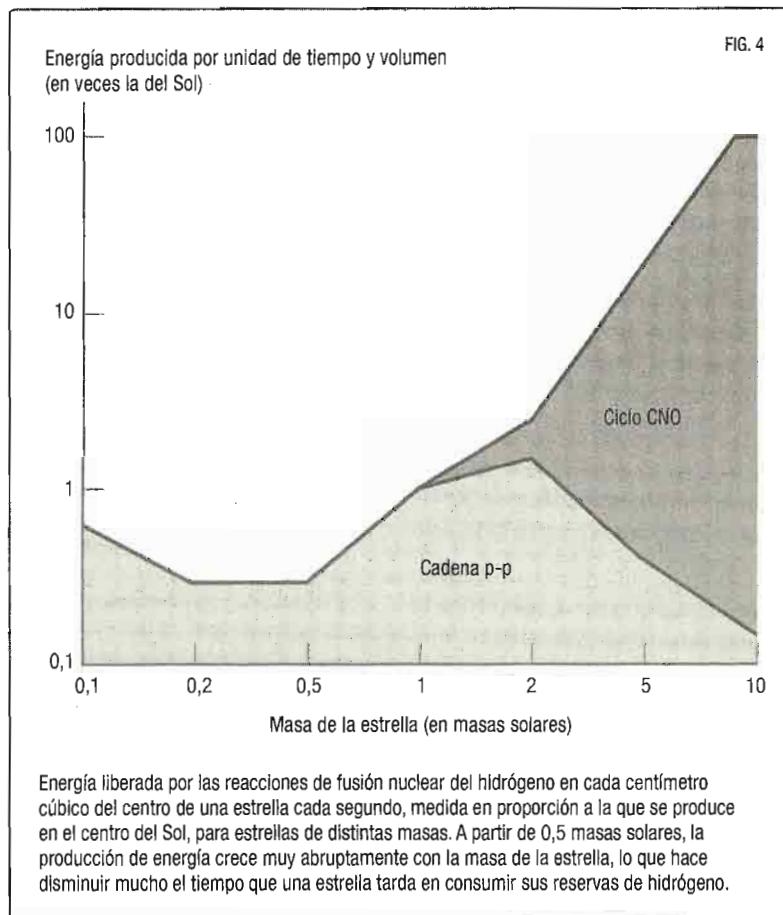


Diagrama de las reacciones nucleares en el ciclo CNO (carbono-nitrógeno-oxígeno). Cada vez que se recorre el ciclo, cuatro protones (núcleos de ${}^1\text{H}$ o hidrógeno-1) se fusionan para formar un núcleo de helio. El ciclo CNO es el principal mecanismo por el que el hidrógeno se fusiona para dar helio en las estrellas más masivas.

partida. El ciclo CNO tiene la ventaja con respecto a la cadena protón-protón de que ninguno de sus pasos representa un cuello de botella, como lo es el primero de esta última, así que una vez que se alcanzan en el núcleo de una estrella las temperaturas necesarias para que tenga lugar el ciclo CNO, el hidrógeno se fusiona con relativa facilidad mediante él. Este hecho y otros factores que discutimos a continuación hacen que las estrellas de mayor masa agoten su hidrógeno en mucho menor tiempo que las de baja masa (figura 4).



¿CUÁNTO PUEDE DURAR UNA ESTRELLA?

Una estrella inicia su existencia en el momento en que empieza a fusionar hidrógeno en su núcleo. La cantidad de hidrógeno que tiene disponible para sostener la fusión nuclear del hidrógeno depende de la cantidad total de gas que colapsó por efecto de su propia gravedad para formarla, es decir, de la masa de la propia estrella. Por tanto, la duración de la existencia de una estrella depende fundamentalmente de su masa inicial. Dicha masa puede de variar mucho de una estrella a otra: en teoría, la menor masa posible es de 0,08 veces la del Sol. Por debajo de ella, la contracción gravitatoria del gas que forma la estrella no es capaz de calentarla hasta las temperaturas necesarias para que se produzca la fusión del hidrógeno. El máximo valor de la masa estelar es más difícil de predecir teóricamente, pero en la práctica las estrellas de más de unas 100 veces la masa del Sol son muy raras. Así pues, existe un factor del orden de 1 000 entre la masa de las estrellas menos masivas y las que lo son más.

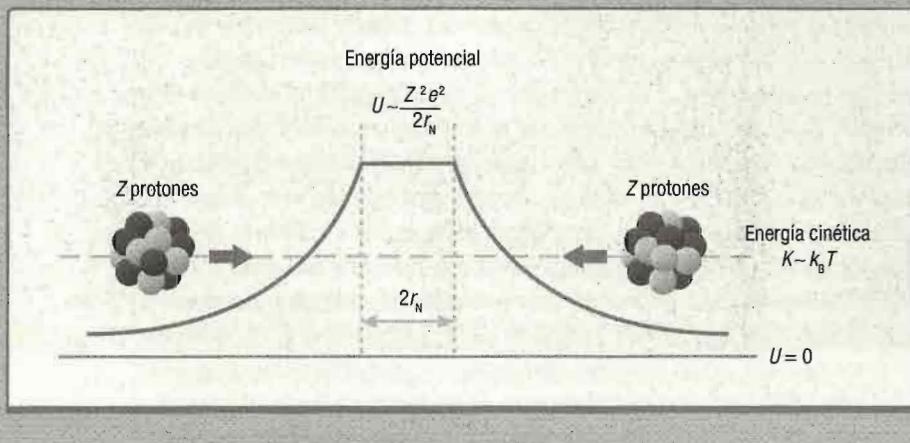
Cabría pensar que cuanto más masiva es una estrella más hidrógeno contiene y mayor tiene que ser el tiempo que le dure esa provisión. Sin embargo, ocurre justamente al revés: cuanto más masiva es, más rápidamente agota su hidrógeno. La causa está en la relación entre la presión, la temperatura y el ritmo bajo los que tienen lugar las reacciones de fusión nuclear en su interior. Cuanto mayor es la masa de una estrella, mayor tiene que ser la presión del gas en su región central, ya que mayor es el peso de las capas exteriores. Pero para que la presión del gas aumente ha de estar a mayor temperatura, así que el gas en el interior de una estrella muy masiva está más caliente que el de una ligera. Por dar algunos valores, el núcleo de una estrella de una masa 0,1 veces la del Sol está a una temperatura de unos 7 millones de grados, el de una estrella de masa similar a nuestro Sol está a unos 15 millones de grados y el de una estrella diez veces más masiva que el Sol está a unos 30 millones de grados. Parece un aumento muy grande, pero al aumentar la masa cien veces la temperatura solo lo ha hecho unas cuatro. Sin embargo, este moderado aumento de la temperatura tiene un efecto enorme sobre el ritmo

¿POR QUÉ CONTAMOS SOLO EL HIDRÓGENO?

Al hablar de la longevidad de las estrellas hemos tenido en cuenta solo el tiempo que pueden mantener reacciones de fusión nuclear entre átomos de hidrógeno. Sin embargo, una vez que acaban con el hidrógeno disponible, aquellas con masas superiores a 0,8 masas solares son capaces de usar el helio como combustible nuclear, fusionando tres núcleos de helio para formar núcleos de carbono-12, y las estrellas de masas mayores son capaces de fusionar núcleos aún más pesados. Pero el tiempo que una estrella puede mantenerse en equilibrio fusionando núcleos de helio o más pesados es mucho más corto que el tiempo que tarda en agotar su hidrógeno. La razón está en que para que dos núcleos atómicos se fusionen su energía cinética K ha de ser comparable a la energía electrostática U (véase la figura) debida a la repulsión entre sus cargas eléctricas positivas, que viene dada por:

$$U \sim \frac{Z^2 e^2}{2r_N}$$

donde Z es el número de protones de los núcleos que se fusionan (suponemos que son idénticos), e es la carga del electrón y r_N es el radio de los núcleos que se fusionan. La energía cinética K de los núcleos es proporcional al producto $k_B T$, donde T es la temperatura en el centro de la estrella y k_B es una constante fundamental llamada *constante de Boltzmann*. El valor del radio nuclear r_N no muestra una gran variación entre núcleos ligeros: así, el radio del núcleo de carbono-12 es solo unas tres veces más grande que el del solitario protón que forma el núcleo del isótopo más común del hidrógeno. Esto hace que la temperatura T a la que ocurre la fusión nuclear de núcleos con Z protones aumente como Z^2 , aunque otros detalles también pueden ser importantes: por ejemplo, en el caso del helio las altas temperaturas son necesarias para que los tres núcleos de He implicados choquen casi simultáneamente entre sí. El aumento de temperatura con el número de protones hace que los choques entre núcleos sean más



frecuentes, lo que incrementa el ritmo al que tienen lugar las reacciones de fusión y acorta el tiempo que la estrella puede usar ese núcleo como combustible. Como ejemplo, la tabla muestra el tiempo que tarda en gastar cada combustible nuclear una estrella de 25 masas solares:

Núcleo	Z	Temperatura mínima (millones de grados)	Tiempo en consumirse
Hidrógeno	1	4	7 millones de años
Helio	2	100	500 000 años
Carbono	12	500	600 años
Neón	20	1200	1 año
Oxígeno	16	1500	6 meses
Silicio	28	2700	1 día



La estrella en el centro de la imagen y envuelta por una nebulosa, SBW2007, es de gran masa y ha agotado ya buena parte de su combustible nuclear.

de las reacciones de fusión nuclear. Este ritmo al que se producen las reacciones de fusión nuclear entre átomos de hidrógeno aumenta con la temperatura, por dos razones. La primera es que, a mayor temperatura, mayor es la energía cinética de los núcleos y, por tanto, mayor es la posibilidad de que se supere la repulsión electrostática entre ellos. La segunda

Vemos solo lo que conocemos.

JOHANN WOLFGANG VON GOETHE

razón es que, a mayor temperatura, mayor es la frecuencia de las colisiones entre núcleos necesarias para que

tenga lugar la fusión. El ritmo de las reacciones nucleares depende muy fuertemente de la temperatura; por dar números redondos, en una estrella de 0,1 veces la masa del Sol, cada segundo solo 1 de cada 10^{18} núcleos de hidrógeno se fusiona con otro núcleo de hidrógeno, mientras que en una estrella como el Sol es 1 de cada 10^{17} y en una estrella 10 veces más masiva que el Sol es 1 de cada 10^{14} . Luego un aumento de algo más de cuatro veces en la temperatura hace que el ritmo de las reacciones de fusión aumente en 10 000 veces. Esto se debe a que a mayor temperatura, mayor es la energía cinética de los núcleos de hidrógeno y más pueden aproximarse entre sí los núcleos antes de encontrarse con la barrera de potencial electrostático, así que menor es la distancia que tienen que atravesar por efecto túnel. A menor distancia, más probable se hace que se dé el efecto túnel. Este aumento tan drástico del ritmo al que se consume el hidrógeno conforme aumenta la masa de una estrella hace que su longevidad disminuya rápidamente a medida que eso ocurre: una estrella como nuestro Sol puede mantener la fusión del hidrógeno en sus regiones centrales durante unos 10 000 millones de años desde su formación, y una estrella de una décima de masa solar puede mantenerse fusionando hidrógeno durante 4 millones de millones de años, mientras que una estrella de diez veces la masa del Sol agota todo el hidrógeno de sus regiones centrales en unos 25 millones de años.

El enorme aumento de la longevidad de las estrellas de masas más bajas comparado con las de masa similar a la del Sol no se debe solo al menor ritmo de las reacciones de fusión nuclear. También contribuye el hecho de que en las estrellas de masa solar

o similar la cantidad de hidrógeno disponible para las reacciones de fusión es solo la contenida en el núcleo del objeto, mientras que en las estrellas de masas menores que 0,3 veces la solar está disponible el hidrógeno contenido en todo su volumen. La diferencia se debe a que en las estrellas de masa comparable a la del Sol no hay mezcla entre las diferentes capas estelares, desde su centro a la superficie, de modo que conforme la fusión nuclear agota el hidrógeno en el núcleo, este no puede ser repuesto desde las capas más alejadas del centro, donde no hay reacciones de fusión nuclear. La situación del gas de la estrella es comparable a la de la atmósfera sobre una ciudad cuando hay un anticiclón en invierno: no hay mezcla vertical de gas y aquellos generados en las capas inferiores no se dispersan hacia las superiores, con la diferencia de que en el caso de la ciudad los gases que se liberan son los humos de las calefacciones y el tráfico y en el caso de la estrella el helio que resulta de la fusión nuclear. Por el contrario, el gas de las estrellas de menor masa se está mezclando continuamente en todo el volumen del astro, con lo que el helio se distribuye por todo él y no se acumula en el núcleo.

EL FUTURO DE LAS ESTRELLAS

La larga vida de las estrellas menos masivas implica que las de este tipo deben ser poco luminosas. La energía que transportan la luz y otras formas de radiación electromagnética que emite una estrella procede de las reacciones de fusión nuclear en su centro, así que las poco masivas, que consumen su hidrógeno de forma muy pausada, deben ser menos luminosas que las más masivas, ya que la luminosidad de una estrella equivale a la cantidad de energía que emite por unidad de tiempo (véase la tabla de la página siguiente). Mientras que una estrella de diez masas solares es unas 4 800 veces más luminosa que el Sol, una estrella de una décima de masa solar tiene una luminosidad del orden de una milésima parte de la solar. Además, las más masivas son más calientes que las menos masivas. El tipo de radiación emitida por una estrella depende de su temperatura, de manera que

Masa (en veces la solar)	Luminosidad	Tiempo en agotar el hidrógeno (millones de años)	Color
0,1	0,03 % de la solar	4 000 000	Rojo
0,2	0,4 % de la solar	1 000 000	Rojo
0,5	10 % de la solar	120 000	Amarillo anaranjado
1	1,2 veces la solar*	10 000	Amarillo
2	15 veces la solar	1 000	Blanco
5	400 veces la solar	90	Blanco azulado
10	4 800 veces la solar	25	Blanco azulado

La luminosidad y el tiempo que una estrella puede mantener las reacciones de fusión nuclear del hidrógeno en su núcleo dependen fuertemente de su masa, como se puede observar en esta tabla. Las estrellas ligeras son muy poco brillantes pero tienen una vida mucho más larga que la de las más masivas. Vistas en luz visible, las estrellas ligeras brillan con tonos rojizos, mientras que las de mayor masa lo hacen con tonos azulados. Por esta razón, una vez que se agota la formación estelar en una galaxia, la luz combinada de todas sus estrellas se enrojece conforme las más masivas agotan su hidrógeno.

* Dependiendo de la edad y metalicidad de la estrella.

una con unas diez veces la masa del Sol emite principalmente en el ultravioleta, una de masa parecida a la del Sol emite sobre todo luz visible y una estrella con un décimo de la masa solar emite básicamente en el infrarrojo. Esta diferencia en el tipo de radiación electromagnética emitida hace que si observamos una galaxia como la nuestra en luz visible, la mayor parte de esa luz procederá de estrellas similares a nuestro Sol o más masivas, dando la falsa impresión de que las de este tipo son las más comunes. Sin embargo, las estrellas de poca masa se forman con mucha más frecuencia que las de masa similar a la solar o superior. Por ejemplo, se estima que las estrellas de masas comprendidas entre 0,1 y 0,5 masas solares nacen con una frecuencia unas mil veces superior que las de masas comprendidas entre 10 y 10,5 masas solares. Además, la corta vida (en términos astronómicos) de las estrellas más masivas provoca que desaparezcan en unas pocas decenas de millones de años. Esto hace

que en cuanto una galaxia deja de formar estrellas, como ya han hecho las galaxias elípticas y les ocurrirá en el futuro a todas las demás, en unas pocas decenas de millones de años solo quedan en ella estrellas de masas inferiores a unas diez masas solares.

Puesto que el color de la luz que emite una estrella depende de su masa, se puede saber si en una galaxia ha cesado la formación estelar midiendo el color de la luz combinada de todas sus estrellas. En una galaxia en la que ya no hay formación estelar solo quedarán estrellas de baja masa, que emiten luz rojiza, mientras que en una galaxia en la que todavía esté vigente habrá estrellas de masas elevadas, cuya luz de tonos azulados predominará sobre el resto de las estrellas de la galaxia. La tasa de formación estelar es menor en las galaxias de mayor masa, así que cuando para un buen número de ellas se representa el color de la luz combinada de todas sus estrellas frente a la masa galáctica, se observa que los puntos que representan a cada galaxia tienden a agruparse en dos regiones: la *nube azul* y la *secuencia roja*. La nube azul agrupa las galaxias en las que la formación estelar no ha cesado y por tanto siguen conteniendo estrellas masivas, que brillan con tonos azulados. La secuencia roja agrupa a las galaxias en las que ya no se forman nuevas estrellas por lo que solo contienen aquellas de baja masa, que brillan con tonos rojizos. Como la tasa de formación estelar es menor en las galaxias más grandes, las de la secuencia roja son por lo general más masivas que las de la nube azul. Además, entre las galaxias de la secuencia roja predominan las galaxias elípticas, mientras que entre las de la nube azul predominan las espirales. Tanto la Vía Láctea como la galaxia de Andrómeda (M31) se encuentran en una posición intermedia entre ambas regiones, pues en ellas la formación estelar está en declive.

EL FIN DE UNA ESTRELLA

Lo que le ocurre a una estrella cuando agota el hidrógeno disponible depende de su masa. En aquellas con masas superiores a 8 masas solares, el núcleo se contrae y se calienta hasta un punto

RESIDUOS ESTELARES

Una vez que una estrella agota todos los elementos químicos que puede usar para mantener la fusión nuclear, ya no puede reponer la energía que pierde al emitir radiación electromagnética. Al perder dicha energía, el gas que forma la estrella se debe enfriar, y puesto que en un gas la presión depende de la temperatura, el resultado es que la presión en el núcleo se hace insuficiente para aguantar el peso de las capas exteriores. El núcleo de la estrella colapsa formando un residuo estelar, lo que hace disminuir la distancia entre los núcleos atómicos y los electrones del núcleo.

Variedad de finales

Cuando la compresión de la materia llega a cierto punto entran en juego efectos cuánticos debidos al principio de exclusión. Este principio establece que electrones, protones y neutrones no pueden tener a la vez la misma posición y la misma cantidad de movimiento (el producto de la masa de cada partícula por su velocidad). En una enana blanca, al quedar un espacio cada vez más reducido para los electrones de cada núcleo, cada uno de ellos debe tener una cantidad de movimiento diferente de los otros electrones de su vecindad. Como hay una elevada

FIG. 1

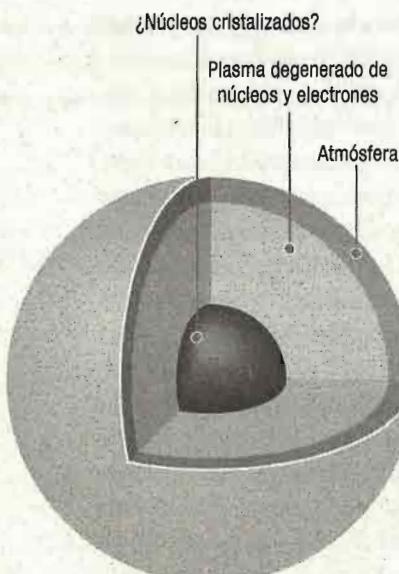
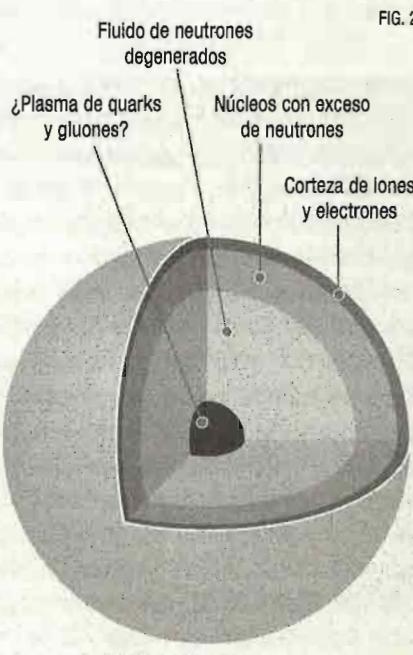


FIG. 2



densidad de electrones, buena parte de ellos debe tener una cantidad de movimiento muy grande para poder cumplir el principio de exclusión, lo que hace incrementar la presión que ejercen. Eso se debe a que la presión que ejerce un conjunto de partículas depende de las colisiones que estas experimentan: a mayor velocidad de las partículas más frecuencia de las colisiones y más violentas son estas, lo que hace aumentar la presión. Los electrones sufren este efecto antes que los núcleos debido a su menor masa: cuanto más masiva es una partícula mayor es el confinamiento necesario para que tenga lugar dicho efecto. En este estado se dice que la materia está degenerada. Si el núcleo estelar que colapsa tiene aproximadamente 1,4 masas solares o menos, la presión generada por los electrones es capaz de detener el colapso del núcleo y se forma una enana blanca (figura 1). Si el núcleo es más masivo, la presión de los electrones no es capaz de detener el colapso y tiene lugar una explosión de supernova. Si el núcleo estelar que colapsa tiene menos de unas dos masas solares (no existe acuerdo unánime sobre este límite), los electrones acaban siendo capturados por los protones de los núcleos atómicos para formar neutrones. Si la presión ejercida por el confinamiento de los neutrones es capaz de detener el colapso, se forma entonces una estrella de neutrones (figura 2). Cuando el núcleo estelar que colapsa es todavía más masivo, se supone que el objeto resultante es un agujero negro de una masa equivalente a unas pocas masas solares.



Una estrella enana blanca brillando en el centro de esta imagen de la nebulosa NGC 6369.

en el que se inicia la fusión del helio en núcleos de elementos químicos más pesados: carbono, nitrógeno y oxígeno. En estas estrellas, el gas del núcleo no se mezcla con el del resto de la estrella, así que una vez que el hidrógeno del núcleo se ha agotado y se inicia la fusión del helio, sigue habiendo hidrógeno disponible en el resto de la estrella. La contracción del núcleo hace que alrededor de la zona donde se produce la fusión del helio aparezca otra zona en la que tiene lugar la fusión del hidrógeno. A su vez, las capas exteriores de la estrella se expanden y esta se convierte en una *gigante roja*. Para las estrellas de masas inferiores a 8 masas solares, una vez que se agota el helio del núcleo, esto supone el fin de las reacciones de fusión nuclear. En las estrellas de masas superiores a 8 masas solares, el carbono, nitrógeno y oxígeno formados como resultado de la fusión del helio pueden usarse para dar lugar a núcleos todavía más pesados, hasta que se forman núcleos de hierro. Formar núcleos más pesados que los de hierro requiere un aporte de energía, por lo que la fusión nuclear no puede progresar en el interior de una estrella a partir del momento en que este elemento se acumula en su núcleo.

Una vez agotada cualquier posible reacción de fusión nuclear en una estrella, esta evoluciona hasta convertirse en un residuo estelar. Las estrellas de masas superiores a unas 8 masas solares acaban estallando como supernovas. En estas gigantescas explosiones se sintetizan los elementos químicos más pesados que el hierro y la estrella que explota devuelve al medio interestelar la mayor parte de su masa, enriquecida con todos los elementos químicos más pesados que el hidrógeno y el helio. El resto de la masa queda atrapada en una estrella de neutrones o, en algunos casos extremos, en un agujero negro. La estrella de neutrones resultante se va enfriando gradualmente a lo largo de millones de años, desde unas temperaturas iniciales en su superficie de centenares de miles de grados.

Las estrellas de masa intermedia, entre 0,8 y 8 masas solares, acaban sus días de una forma más discreta. Cuando se agota el helio de su núcleo, este se contrae y las capas exteriores de la estrella se dispersan paulatinamente en el medio interestelar formando una nebulosa planetaria. El material de esta nebulosa

sa enriquece el medio interestelar con los elementos químicos formados por la fusión del helio: carbono, nitrógeno y oxígeno. El núcleo de la estrella acaba formando una enana blanca, que brilla debido a la continua liberación de calor conforme el astro se enfriá. El proceso de enfriamiento de una enana blanca es muy lento: se estima que una que inicialmente tenga la misma luminosidad que nuestro Sol tarda centenares de millones de años en enfriarse tanto como para que su luminosidad sea del orden de la centésima parte de la solar. Tras esa primera etapa de enfriamiento «rápido» la velocidad baja considerablemente: se estima en decenas de miles de millones de años el tiempo que puede tardar una enana blanca en enfriarse lo suficiente como para dejar de ser observable.

Por último, las estrellas más ligeras, que nunca llegan a fusionar núcleos de helio, se contraen poco a poco una vez que se les acaba el hidrógeno y forman también enanas blancas. Sin embargo, el tiempo que requieren estas estrellas para agotar su hidrógeno es mucho más grande que la edad del universo, por lo que se supone que ninguna de ellas ha llegado todavía a alcanzar dicha etapa.

La larga vida de las estrellas de menor masa asegura que las galaxias seguirán estando pobladas por ellas durante millones de millones de años, una vez que termine la producción de nuevas estrellas en todas las galaxias del universo, en las próximas decenas de miles de millones de años. El aspecto de las galaxias en un futuro tan lejano dependerá de la proporción de las estrellas de baja masa respecto al número total de cuerpos estelares, de lo que ocurría con las estrellas que agotan el hidrógeno en su núcleo y del brillo de las que sobrevivan hasta entonces.

El ocaso cósmico

Dentro de algunos millones de millones de años, todo el universo estará formado por galaxias de estrellas envejecidas que poco a poco se irán apagando. El destino de estos resoldos no puede predecirse con completa seguridad, pero es posible hablar de algunos de los fenómenos sobre cuya futura importancia existe un mayor acuerdo científico.

Para una galaxia, el fin de la formación estelar significa que solo puede mantenerse como objeto luminoso mientras sigan activas las estrellas que la forman. Transcurridas unas pocas decenas de millones de años tras el final de la formación estelar, las últimas estrellas formadas con masas superiores a unas 8 masas solares explotan como supernovas. Como los elementos químicos más pesados que el hierro se sintetizan en estas explosiones, la desaparición de las estrellas más masivas implica que ya no se forman en la galaxia nuevas cantidades de estos elementos. Estas estrellas son también las más luminosas y las que emiten una luz más azulada, así que su desaparición hace que la luz combinada de todas las estrellas de la galaxia se torne amarillenta, pues una mayor proporción de la luminosidad galáctica pasa a proceder de aquellas con menor masa. En este punto, la composición química de la materia de una galaxia sigue siendo principalmente hidrógeno y helio, solo que estos elementos están atrapados en su mayor parte en estrellas de baja masa y el resto está distribuido en forma de gas caliente y poco denso del que ya no pueden formarse cuerpos estelares. Esta es la situación en la que se encuentran las galaxias elípticas gigantes que podemos observar:

siguen estando formadas mayoritariamente por hidrógeno y helio, si bien en proporción algo menor que en la nuestra, pero en ellas ya no se forman estrellas.

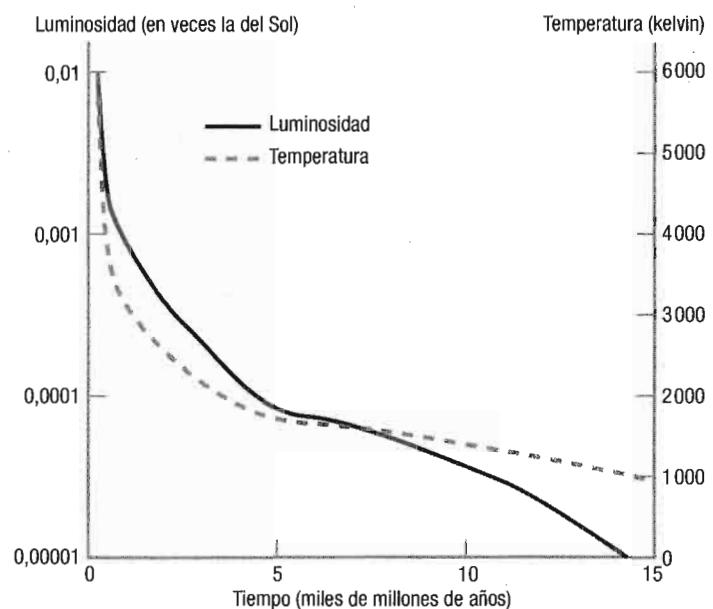
Aunque la desaparición de las estrellas de mayor masa cambie el color de la luz que emite la galaxia, ello no tiene una importancia demasiado grande sobre su luminosidad total. A pesar de que las estrellas de menor masa son menos brillantes que las estrellas más masivas, son en cambio muchísimo más numerosas. Además, la desaparición paulatina de las estrellas de la galaxia se ve compensada parcialmente, porque la luminosidad de una estrella tiende a aumentar a lo largo de su existencia. Gracias a esto, la luminosidad de una galaxia en la que han dejado de formarse estrellas puede mantenerse hasta transcurridos algunos millones de millones de años, cuando solo queden en ella las de muy baja masa y residuos estelares.

Poco se puede decir con seguridad sobre lo que pasará una vez que se apaguen las últimas estrellas. El resultado será una galaxia formada por enanas blancas (figura 1), estrellas de neutrones, agujeros negros, enanas marrones y planetas que poco a poco irán enfriándose hasta temperaturas cercanas al cero absoluto, mientras orbitan alrededor del agujero negro central de la galaxia. Los físicos teóricos han hecho muchas propuestas de lo que ocurrirá una vez que en todo el universo las galaxias hayan llegado a ese estado. Aquí discutiremos tres fenómenos sobre los que existe un mayor acuerdo: el decaimiento de las órbitas por *radiación gravitatoria*, la *evaporación de los agujeros negros* y la desaparición de la materia ordinaria debido al *decaimiento de los protones*.

EL DECAIMIENTO DE LAS ÓRBITAS

A muy largo plazo, el destino de la mayoría de los cuerpos que orbiten alrededor del agujero negro central de una galaxia es caer en él. La razón es que, según la relatividad general, un cuerpo que orbita en torno a otro pierde energía por radiación gravitatoria. Para entender en qué consiste la radiación gravitatoria

FIG. 1



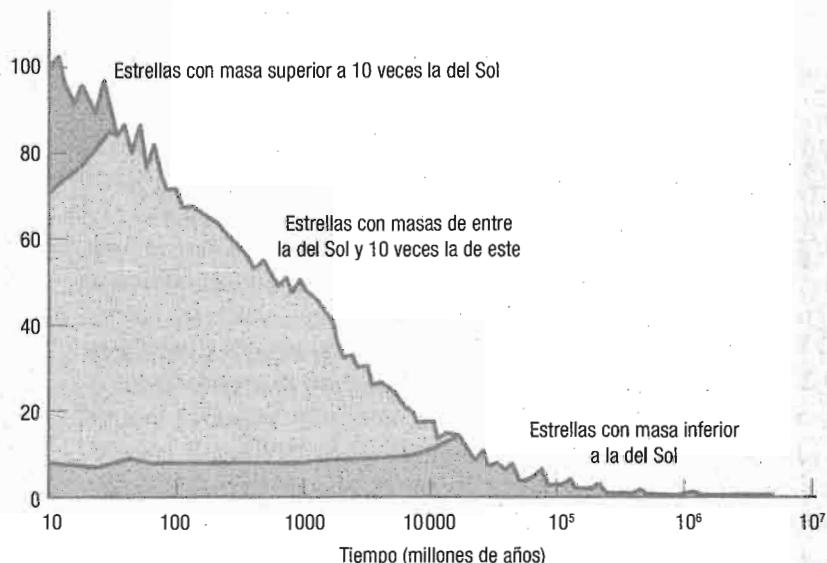
El gráfico muestra el decaimiento de la temperatura y la luminosidad de una enana blanca típica formada al extinguirse una estrella de unas 2,5 masas solares. El eje de tiempos de la figura abarca un intervalo similar a la edad del universo en la actualidad. Incluso tras un tiempo tan dilatado, la superficie de una enana blanca sigue estando a una temperatura relativamente alta, que le permite continuar brillando, si bien muy débilmente.

podemos usar como ejemplo aquella emitida por un planeta en órbita alrededor de una estrella. Supondremos que nosotros nos encontramos como observadores en una nave espacial que se encuentra lejos de ambos: si el planeta es la Tierra y la estrella es el Sol, tendremos que estar alejados más de un año-luz. En general, tendremos que estar alejados de la estrella una distancia superior a la que recorre la luz mientras el planeta completa una órbita en torno a ella. Ponemos esta condición porque a distancias menores el efecto de las ondas gravitatorias es más complicado que el que se expone aquí. También supondremos que la nave espacial no está cerca de ninguna otra masa importante

LA EXTINCIÓN DE LA LUZ ESTELAR EN NUESTRA GALAXIA

Si toda la formación estelar de la Vía Láctea cesara repentinamente en la actualidad, la galaxia seguiría teniendo estrellas durante algo más de un millón de millones de años, si bien su luminosidad iría disminuyendo conforme las estrellas más masivas se fueran extinguriendo. En la figura se muestra una estimación de la evolución de la luminosidad de nuestra galaxia bajo tales circunstancias. La luminosidad total es la suma de los tramos aportados por los tres tipos principales de estrellas; al principio hay tres tramos, después dos y al final sólo uno, el de las estrellas de menor masa, las más longevas. Se puede entender mejor este concepto con un simulacro doméstico. Tenemos en el salón una lámpara con tres bombillas. Una de ellas representa a las estrellas de menos de 1 masa solar; otra, a las estrellas de entre 1 y 10 masas solares, y la tercera, a las de más de 10 masas solares. La luminosidad total de la lámpara (la luminosidad total de la galaxia) es la suma de la luminosidad aportada por las tres bombillas. Primero se funde la bombilla que representa a las estrellas de más de 10 masas solares, y sólo quedan las dos bombillas que representan a las estrellas de menos de 1 masa solar y a las de entre 1 y 10, así que la luminosidad total de la lámpara disminuye un poco. Después, se funde la

Porcentaje de la luminosidad actual



Estimación de la evolución de la luminosidad de la Vía Láctea si de repente dejases ahora de formarse estrellas en ella.

bombilla que representa a las estrellas de 1 a 10 masas solares y baja aún más la luminosidad de la lámpara, que queda con solo una bombilla, la que representa a las estrellas de menos de 1 masa solar. Cuando finalmente se funde esta, la lámpara (la galaxia) se apaga.

La luminosidad disminuye poco a poco

La diferente duración de las bombillas representa la diferente duración de cada clase de estrella. Las bombillas no se apagan de golpe, porque representan poblaciones de estrellas en un rango de masas (menos de 1, entre 1 y 10, y más de 10 masas solares) y a cada masa le corresponde una determinada duración de la vida de la estrella. El ejemplo de la lámpara se parece más a la realidad si las tres bombillas no tienen la misma luminosidad. Las estrellas de masas menores que 1 masa solar son muy abundantes, pero poco luminosas, así que la bombilla que las representa es débil (su franja en la gráfica es estrecha). Las estrellas de masas superiores a 10 masas solares son muy brillantes, pero poco numerosas, así que también están representadas por una bombilla débil (franja estrecha en la gráfica). Las estrellas de masa entre 1 y 10 masas solares son las que más contribuyen a la luminosidad total de la galaxia, así que su bombilla es la más brillante (franja gruesa en la gráfica). En la realidad, la formación estelar disminuye de forma paulatina, lo que hará que el declinamiento en la luminosidad de la galaxia sea menos pronunciado que el expuesto en la figura.



La formación de nuevas estrellas, como la que está teniendo lugar aquí, en la nebulosa M78, es un fenómeno que cada vez será menos habitual.

y que el interior del vehículo está en situación de ingravidez, lo cual puede conseguirse si apagamos sus motores.

Para detectar en nuestra nave las ondas gravitatorias creadas por el movimiento de la Tierra alrededor del Sol debemos colocar en ella un par de masas de prueba (un par de esferas, por ejemplo) de forma que la línea imaginaria entre ellas sea perpendicular a la dirección que une nuestro vehículo con el Sol. Como estamos en situación de ingravidez, las masas se quedarán flotando en el punto en el que las coloquemos. Aquí al lector quizás se le ocurra que las dos masas deben atraerse gravitatoriamente entre sí, pero podemos elegir los valores de las masas de prueba todo lo pequeñas que queramos para que este efecto no sea importante. Cuando pase una onda gravitatoria veremos que la distancia entre ambas masas aumenta y disminuye periódicamente en una proporción muy pequeña: para el caso de la Tierra y el Sol, a una distancia de un año-luz esta contracción es del orden de una parte en 10^{26} . Se trata de un efecto pequeñísimo: para que el cambio en la distancia entre las dos masas de prueba sea igual al diámetro de un protón tienen que estar separadas por un millón de kilómetros.

En principio podríamos detectar la variación periódica en la distancia entre las dos masas de prueba midiéndola con una regla, suponiendo que esta es perfectamente rígida, es decir, que no puede sufrir deformaciones. El cambio en la distancia entre las masas de prueba se debe a que el espacio entre ellas se estira y se contrae, pero la longitud de un cuerpo perfectamente rígido no se ve afectada. Decimos «en principio» porque de momento no se han detectado ondas gravitatorias en los varios experimentos que se han puesto en funcionamiento para ello. Sin embargo, su existencia se considera probada por otras medidas indirectas, de las que hablaremos más adelante. En los experimentos cuyo diseño sigue la idea de las masas de prueba de las que hemos hablado antes, estas son espejos suspendidos de modo que queden aislados de cualquier perturbación mecánica del entorno. La medida de la longitud entre masas de prueba se hace mediante haces de luz láser que se reflejan en los espejos. Se emplean dos haces láser perpendiculares entre sí porque, al contrario que una

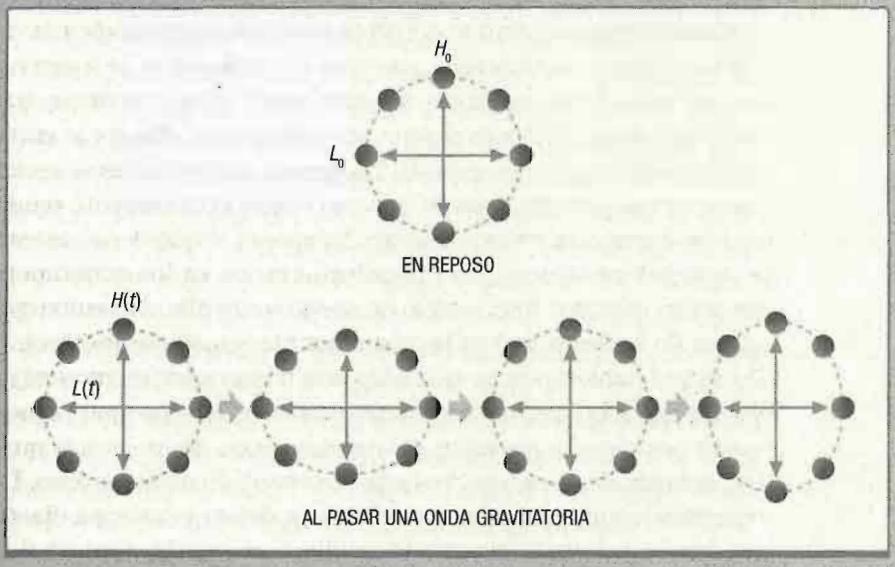
ONDAS GRAVITATORIAS

Para entender qué es una onda gravitatoria, supongamos que estamos en ingravidez en una nave espacial lejos de cualquier objeto masivo y tenemos varias partículas flotando en el espacio formando un círculo (véase la situación en reposo de la figura). Las partículas deben tener muy poca masa para que su atracción gravitatoria mutua sea despreciable. Si llamamos L_0 y H_0 a la longitud del diámetro horizontal y el vertical, tendremos que $L_0 = H_0$, como corresponde a un círculo. La llegada de una onda gravitatoria de periodo T viajando en dirección perpendicular al papel y en sentido hacia el lector (véase la situación expuesta en la parte inferior de la figura) da lugar a que las distancias L y H cambien con el tiempo como:

$$L = L_0 \left[1 + h \cos \left(2\pi \frac{t}{T} \right) \right]$$

$$H = H_0 \left[1 - h \cos \left(2\pi \frac{t}{T} \right) \right]$$

donde h , que es la amplitud de la onda, es un número muchísimo menor que 1 en todas las situaciones que físicamente son posibles. El periodo T es la mitad del periodo orbital de la fuente de ondas gravitatorias. Por ejemplo, en el caso de las ondas gravitatorias radiadas por el sistema Tierra-Sol, T vale medio año, por lo que cada partícula tardará seis meses en hacer una oscilación completa. La combinación de amplitudes pequeñísimas y frecuencias tan bajas es lo que hace a las ondas gravitatorias tan difíciles de detectar.



regla rígida, la longitud de onda de la luz también experimenta cambios debidos al paso de la onda gravitatoria, por lo que para llevar a cabo la detección es necesario comparar los efectos en los dos haces.

Al igual que las olas del mar, las ondas gravitatorias transportan energía, y esa energía debe salir de aquella con la que cuenta el planeta, lo que requiere que aclaremos qué tipos de energía tiene un cuerpo que orbita en torno a otro que está estacionario. Entre ambos cuerpos existirá una cierta separación, igual al radio de la órbita. Para separar dos cuerpos en interacción gravitatoria hace falta aportar una energía. Por ejemplo, cuando un atleta levanta unas pesas, sus músculos tienen que aportar una cierta cantidad de energía porque estas son atraídas por la Tierra, que en este ejemplo hace las veces de cuerpo central. Cuanto mayor es la altura a la que se levantan las pesas o mayor es la masa de estas, mayor es la energía que tiene que aportar el atleta. Esta energía está almacenada en las pesas: si las soltamos, nos devuelven al caer la energía que proporcionó el atleta. A la energía que tienen cuando están en alto se la llama *energía potencial gravitatoria*. Del mismo modo que las pesas, un cuerpo en órbita tiene una energía potencial gravitatoria que aumenta con la distancia al cuerpo central. En física, a la energía potencial gravitatoria se le asigna por convención signo negativo: el valor máximo que puede tener la energía potencial de un cuerpo es cero cuando está a una distancia infinita del cuerpo central. Un cuerpo en órbita tiene también otro tipo de energía llamada *energía cinética*, debido al hecho de que se encuentra en movimiento. La energía cinética es la energía que debemos aportar para poner un cuerpo en movimiento, por ejemplo al lanzar una pelota. La energía cinética aumenta con la masa de la pelota (no es lo mismo lanzar una de tenis que un balón medicinal) y con la velocidad con la que parte durante el lanzamiento. En física, la energía cinética de un cuerpo tiene siempre valor positivo. La energía total del cuerpo en órbita es la suma de su energía cinética y su energía potencial. Cuando se hacen las cuentas resulta que para un cuerpo en órbita la energía cinética es igual a la mitad del valor absoluto de su energía potencial, así que, en conjunto, la energía total de un cuerpo en órbita es igual a

la mitad de su energía potencial gravitatoria, y cuanto más alejado esté del cuerpo central, mayor es su energía total.

La energía que transportan las ondas gravitatorias emitidas por un cuerpo en órbita hace que disminuya la energía total de este, el cual poco a poco se va aproximando al cuerpo central hasta acabar colisionando con él. Este efecto es la forma indirecta a la que nos referíamos antes mediante la que se ha comprobado la existencia de ondas gravitatorias. Los cuerpos para los que se ha medido este efecto no son la Tierra y el Sol, sino un par de estrellas de neutrones (el sistema binario PSR B1913+16) que giran una alrededor de la otra en un periodo de 8 días, a una distancia comparable al diámetro solar. La pérdida de energía por radiación gravitatoria hace que las dos estrellas de neutrones se acerquen una a la otra con el paso del tiempo, lo que se traduce en una disminución del periodo de rotación mutuo de unos 75 microsegundos por año. La tasa a la que disminuye el periodo de rotación coincide con las predicciones de la relatividad general, lo que se considera una prueba indirecta de la existencia de ondas gravitatorias. El hecho de que el efecto de estas últimas se haya podido medir en este sistema y no en otro, se debe a que cuando el periodo de una órbita se hace del orden de años las ondas gravitatorias emitidas son tan tenues que los tiempos necesarios para notarlo son enormes. Por ejemplo, para el caso de la Tierra y el Sol el tiempo necesario para que toda la energía de la Tierra se disipe por radiación gravitatoria es de 10^{23} años, que es un valor enorme. Para ponerlo en perspectiva, el tiempo que una estrella del tamaño de nuestro Sol tarda en agotar todo su hidrógeno es de unos 10000 millones de años (10^{10} años): durante 10^{23} años podrían formarse y extinguirse 10 millones de millones de soles como el nuestro, uno después del otro. Las estrellas de menor masa tienen una vida de varios millones de millones de años, o sea algo más de 10^{12} años, todavía muchísimo menor que 10^{23} años. Cuanto mayor es el radio de la órbita que consideremos, mayor es el tiempo que tarda en decaer por radiación gravitatoria. Para

Un día es una eternidad
en miniatura.

RALPH WALDO EMERSON

el caso de una estrella en órbita alrededor del agujero negro central de la galaxia, el tiempo de decaimiento de su órbita se estima que no es menor de 10^{24} años. Transcurrido ese tiempo desde el presente ya no habrá estrellas, sino residuos estelares (enanas blancas, estrellas de neutrones y posiblemente agujeros negros). No todos ellos caerán en el agujero negro central de la galaxia, algunos quizás escapen debido a interacciones gravitatorias lejos de las regiones centrales de la galaxia. Aun así, a los restos estelares que escapen de ser engullidos por dicho agujero negro central les pueden pasar otras cosas durante la enormidad de tiempo que son 10^{24} años, como veremos a continuación.

LA EVAPORACIÓN DE LOS AGUJEROS NEGROS

Ni siquiera los agujeros negros duran para siempre, pues pierden su masa a un ritmo extremadamente lento, en un proceso que se ha dado en llamar evaporación, por analogía con la pérdida de masa que experimenta un líquido contenido en un recipiente a través de su superficie. Dado que los agujeros negros son los objetos donde la atracción gravitatoria alcanza sus valores más extremos, tanto que ni la luz puede escapar de su interior, parece sorprendente que puedan evaporarse. Pero es precisamente esta gravedad tan intensa una de las causas de su evaporación. La intensidad de la atracción gravitatoria de un cuerpo masivo depende de la distancia a la que nos encontremos de él: es nula a distancia infinita y va aumentando conforme nos acercamos al centro del cuerpo, suponiendo que tenga forma esférica. Podemos medir la intensidad de la atracción gravitatoria de un cuerpo masivo a partir de la velocidad de escape. Esta es la velocidad inicial mínima que debe tener un segundo cuerpo que se aleje radialmente para que no vuelva a caer hacia él. En el caso de un agujero negro, a una cierta distancia llamada *radio de Schwarzschild* la velocidad de escape se hace igual a la velocidad de la luz. Dado que ningún cuerpo puede moverse a velocidades superiores a la de la luz, a distancias menores que el radio de Schwarzschild todos los cuerpos quedan confinados para siempre dentro

del agujero negro. A la esfera de radio igual al radio de Schwarzschild se la llama *horizonte de sucesos*. La elección del nombre viene del hecho de que como cualquier señal se propaga como máximo a la velocidad de la luz, alguien o algo fuera del horizonte de sucesos no puede saber lo que ocurre dentro de él, pues no podrá recibir ninguna información desde allí. El horizonte de sucesos hace las veces de superficie del agujero negro.

El fenómeno al que se debe que los agujeros negros puedan evaporarse es la existencia de *partículas virtuales* en el vacío. Dicha existencia se debe al principio de indeterminación, uno de los principios en los que se basa la mecánica cuántica. En una de sus versiones, el principio de indeterminación nos dice que si medimos la cantidad de energía E en una región del espacio durante un tiempo Δt , la medida tendrá una indeterminación ΔE que será tanto mayor cuanto menor sea el tiempo Δt . En el caso de que la región del espacio que estemos observando esté vacía, la cantidad de energía E que deberíamos medir es cero si hiciéramos la medida durante un tiempo Δt muy grande. Si en cambio hacemos las medidas repetidas veces durante tiempos Δt muy pequeños, obtendremos valores entre cero y ΔE , luego no sabremos decir si esa región del espacio está realmente vacía o contiene una energía ΔE . En mecánica cuántica, la energía puede estar en forma de partículas que median interacciones, como los fotones, o partículas constitutivas de la materia, como los electrones o los quarks, ya que la equivalencia entre masa y energía nos dice que la masa m de una partícula de materia es equivalente a una energía $E = mc^2$. El hecho de que en una región del espacio haya una energía ΔE se traduce en que en ella puede haber partículas (fotones, electrones u otras) tales que su energía total sume ΔE . El número y tipo de partículas que pueden existir depende también de otras reglas de la mecánica cuántica que son demasiado extensas para explicarlas aquí, aunque todas ellas se basan en la conservación de ciertas cantidades. Por ejemplo, la carga eléctrica total debe conservarse, así que si suponemos que la energía ΔE se debe a la existencia de un electrón, que tiene carga eléctrica negativa, tendremos que considerar que también existe un positrón, que tiene carga eléctrica

positiva, de modo que la carga total sea nula como corresponde al vacío. El electrón y el positrón tienen la misma masa m_e , luego para que podamos suponer que existen durante el tiempo Δt en que realizamos nuestra medida ha de cumplirse que $\Delta E \geq 2m_e c^2$. En general, si suponemos la presencia de una partícula debemos suponer la presencia simultánea de su antipartícula.

Siguiendo con el ejemplo del electrón y el positrón, podemos preguntarnos qué pasa con ellos después del tiempo Δt en el que hacemos la medida. Obviamente, no pueden seguir existiendo, pues habríamos hecho aparecer dos partículas de la nada. La respuesta es que el electrón y el positrón se aniquilan entre sí y se hacen desaparecer mutuamente. Pero en el caso de un agujero negro no siempre ocurre así si la región del espacio que estamos observando está muy cerca del horizonte de sucesos. Para entender el efecto del horizonte de sucesos tenemos que tener en cuenta otro principio de la mecánica cuántica: la *dualidad* entre onda y partícula. Este principio dice que toda partícula se comporta también como una onda y viceversa. La onda asociada a una partícula tiene una cierta extensión espacial: para no entrar en detalles matemáticos podemos identificar la extensión espacial de la onda asociada a una partícula con su longitud de onda. Usando ondas en vez de partículas y volviendo al ejemplo del electrón y el positrón virtuales podemos imaginar su aparición y desaparición como la formación espontánea de dos ondas, una para el electrón y otra para el positrón, cada una con una cierta extensión espacial, que se propagan separándose momentáneamente durante un tiempo Δt para luego volver a unirse y cancelarse la una con la otra. Pero si el par de partículas virtuales se forma justo en el horizonte de sucesos, una de las ondas puede propagarse hacia el interior del agujero negro mientras que la otra lo hace hacia el exterior. La onda que ha penetrado en el horizonte de sucesos no puede volver a salir ya que nada sale de su interior, con lo cual su compañera no puede ser cancelada. De este modo, del par de partículas virtuales que apareció en el horizonte de sucesos se ha formado una partícula real, que al estar fuera del horizonte de sucesos puede abandonar las proximidades del agujero negro. En principio, nos da igual que la par-

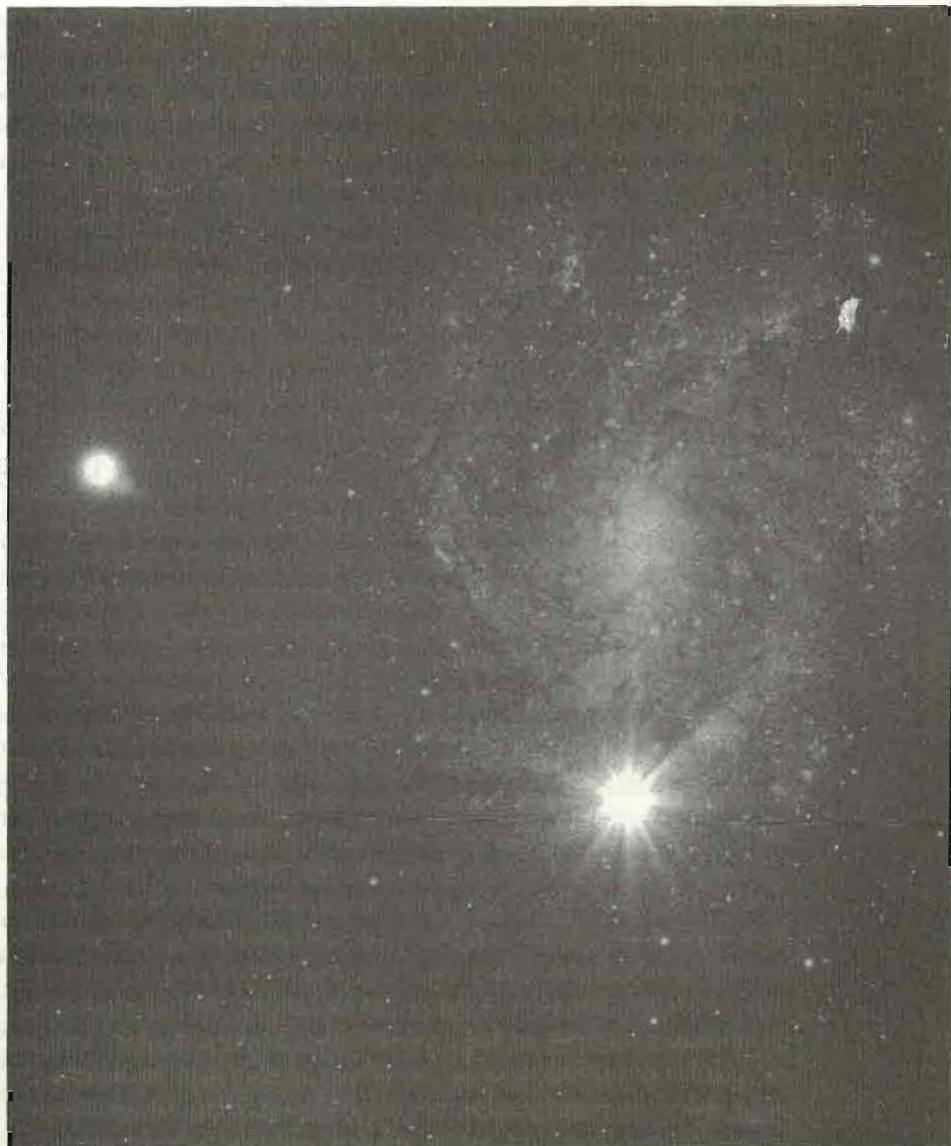
tícula que escapa sea un electrón o un positrón: en ambos casos portará al menos una energía igual a $m_e c^2$. Como la energía ha de conservarse, esta energía debe proceder de la masa del agujero negro, que la verá reducida.

Si seguimos imaginando las partículas como ondas, es razonable suponer que la probabilidad de que alguna de las dos partículas del par virtual se propague hacia el interior del horizonte de sucesos es mayor cuanto mayor sea la extensión espacial de la onda asociada a cada partícula, pues de este modo el par virtual puede aparecer a mayor distancia del horizonte de sucesos y todavía parte de las ondas asociadas a las partículas del par puede estar parcialmente dentro de este horizonte. La extensión espacial de la onda asociada a cada partícula la medimos por su longitud de onda, pero la longitud de onda de la onda asociada a una partícula es tanto mayor cuanto menor es la energía de la partícula. Por tanto, un agujero negro debe radiar partículas de muy baja energía (es decir, de mucha longitud de onda). Cuando se hacen las cuentas, resulta que la longitud de onda de las partículas que radia un agujero negro es comparable al tamaño del propio agujero negro. Para uno con una masa de unas diez masas solares, que es comparable a los que podrían resultar del colapso de una estrella, las únicas partículas que pueden escapar de él como consecuencia de la formación de pares virtuales son fotones de muy baja energía, similares a los que radiaría un cuerpo que tuviera una temperatura de 6 milmillonésimas ($6 \cdot 10^{-9}$) de kelvin (K). En comparación, los fotones del fondo cósmico de microondas, que es la radiación electromagnética procedente de las etapas iniciales del universo, se corresponden con los que radiaría un cuerpo que tuviera una temperatura de 2,7 K. Emitiendo fotones de tan baja energía, un agujero negro tarda un tiempo enorme en evaporarse. Para un agujero negro de la masa que hemos dado como ejemplo, el tiempo para evaporarse sería de 10^{70} años. El tiempo que tarda un agujero negro en evaporarse aumenta muy rápidamente con su masa: para uno de un millón de masas solares, comparable a los que se encuentran en el centro de las galaxias, el tiempo que tarda es de 10^{85} años. A un agujero negro del centro de una galaxia le daría tiempo de engullir los residuos estelares que quedaran en

ella y fueran cayendo hacia él por radiación gravitatoria, antes de evaporarse y devolver al espacio toda la materia que tragó a lo largo de su existencia en forma de fotones de muy baja energía. Sin embargo, como ya dijimos, algunas de las enanas blancas, estrellas de neutrones, enanas marrones y planetas errantes quizá escapen a este destino al ser expulsados de la galaxia por interacciones gravitatorias (véase la imagen de la página contigua).

LA DESINTEGRACIÓN DEL PROTÓN

La materia ordinaria que no haya caído en un agujero negro puede que tampoco dure para siempre. Al hablar de la fusión nuclear que ocurre dentro de las estrellas ya comentamos que la materia ordinaria está formada por electrones, protones y neutrones, siendo estos dos últimos tipos de partículas los componentes de los núcleos atómicos. También dijimos sin entrar en detalles que los neutrones que no se encuentran dentro de un núcleo atómico son inestables y que en un tiempo del orden de minutos se desintegran transformándose en un protón, un electrón y un antineutrino. Mientras que el electrón y el antineutrino son partículas elementales, lo que significa que no poseen ningún tipo de estructura interna conocida, el neutrón y el protón no lo son, ya que están formados por otras partículas más pequeñas llamadas *quarks*, que sí son, que se sepa, elementales. Dos tipos de quarks forman los protones y los neutrones: el quark *up*, con carga eléctrica igual a $+2/3$ de la del electrón, y el quark *down*, con carga eléctrica igual a $-1/3$. En cada protón y cada neutrón hay tres quarks: un neutrón está formado por dos quarks *down* y un quark *up* mientras que un protón está formado por dos quarks *up* y un quark *down*. Los electrones y los neutrinos son partículas con propiedades radicalmente diferentes de los quarks. Estos últimos se atraen entre sí mediante una fuerza llamada interacción nuclear fuerte, que no afecta a los electrones ni a los neutrinos. Por esta razón en la física de partículas se agrupan por un lado los electrones y los neutrinos, junto con otras partículas, en una categoría llamada *leptones*, mientras que los quarks se agrupan



Recreación artística de estrella (la más brillante de la izquierda) fugada de nuestra galaxia desde su posición inicial en ella, marcada por el destello en la parte inferior de la galaxia. Según algunos análisis, entre ellos el realizado por el equipo de Stephan Geier, astrónomo del ESO, esta estrella errante, US 708, está moviéndose lo bastante rápido como para salir de la Vía Láctea.

en otra diferente. Una de las reglas que siguen las interacciones entre partículas elementales es que el número de leptones antes y después de una interacción debe ser idéntico, y lo mismo ocurre con el número de quarks. Al hacer los cálculos, las partículas cuentan con valores positivos y sus correspondientes antipartículas con un número negativo. Por ejemplo, en la desintegración del neutrón en un protón, un positrón y un antineutrino se conserva el número de quarks, porque antes de la desintegración hay tres quarks en el neutrón y después quedan tres quarks en el protón, y también se conserva el número de leptones, pues antes de la desintegración no hay ningún lepton y después de ella aparece un electrón que cuenta como +1 lepton, mientras que el antineutrino cuenta como -1 lepton, con lo que el número neto de leptones sigue siendo cero.

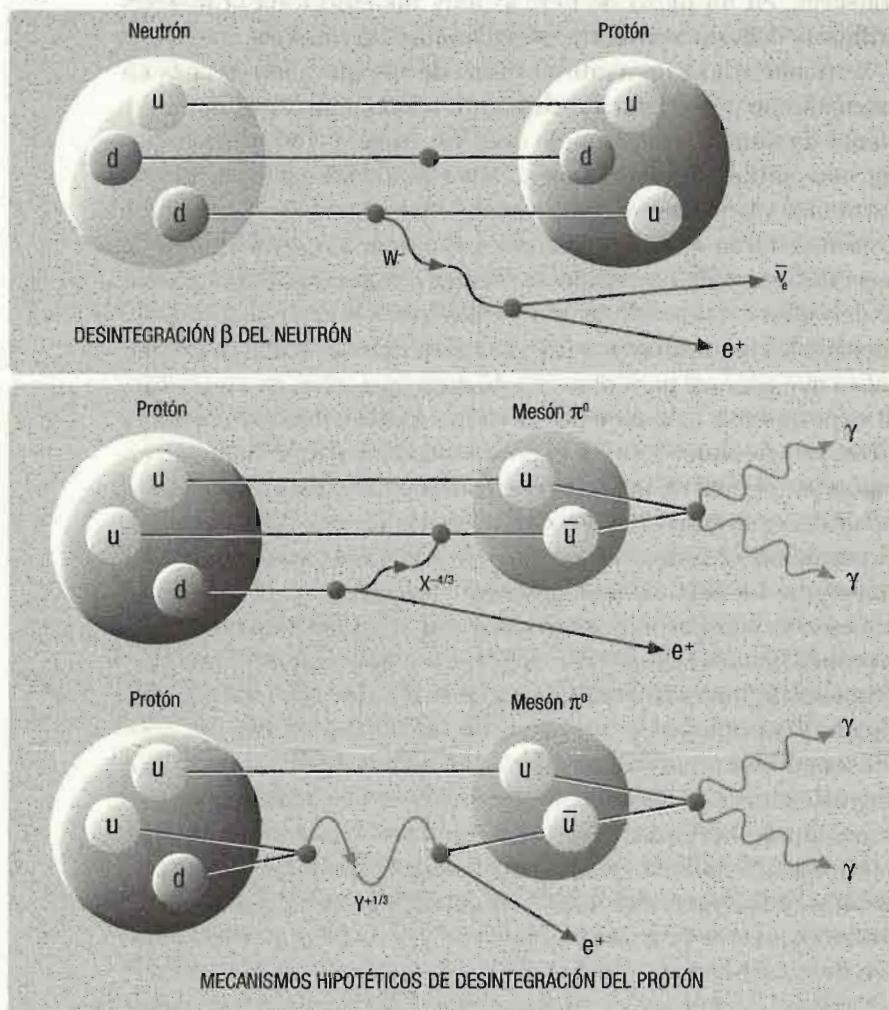
La cuestión de que un neutrón aislado se transforme espontáneamente en un protón se explica por el hecho de que la energía asociada a la masa ($E=mc^2$) de un neutrón es ligeramente mayor que la de un protón: un neutrón tiene una masa un 0,14% mayor que la de un protón. Como cualquier sistema físico tiende siempre a los estados de menor energía, un neutrón tiende a desintegrarse en un protón para llegar a un estado de menor energía. Como hemos visto, esta transformación es posible porque no se viola la regla de conservación del número de quarks ni la del número de leptones. Por su parte, el protón es la más ligera de todas las partículas compuestas de tres quarks, luego debe ser estable, pues de otro modo su desintegración no cumpliría la regla de conservación del número de quarks. En ningún experimento llevado a cabo hasta ahora se ha observado que no se cumplan estas dos reglas. Sin embargo, sabemos que la regla de conservación del número de quarks no se ha cumplido siempre a lo largo de la historia del universo. Esto se debe a que en él no se observan grandes cantidades de partículas formadas por *antiquarks*, como por ejemplo antiprotones o antineutrones, salvo los que aparecen de forma transitoria en procesos muy exóticos. Y esto significa que el número total de quarks del universo observable es positivo y muy grande. No obstante, los quarks que existen en la actualidad debieron ser creados por algún proceso físico durante

el Big Bang. Como este proceso físico creó más quarks que antiquarks, para que tras aniquilarse quarks con antiquarks quedaría el remanente de quarks con el que cuenta el universo en la actualidad, debemos concluir que deben existir procesos físicos en los que se incumple la norma de la conservación de su número.

Algunos físicos han propuesto que la formación de un exceso de quarks sobre antiquarks en los instantes iniciales del universo y que en el laboratorio se observe que el número de quarks se conserva, puede explicarse si la regla de conservación del número de quarks se viola solo muy infrecuentemente. De este modo, en el laboratorio no se observan violaciones a la regla porque para observar un proceso en el que no se conservara el número de quarks habría que esperar un tiempo muy grande, mientras que en las etapas iniciales del universo solo se habrían formado quarks en una proporción ligerísimamente mayor que la de antiquarks: la inmensa mayoría de los quarks se habrían aniquilado con su correspondiente antiquark y los quarks que quedan en la actualidad serían el remanente de esa pequeña asimetría en el número de quarks sobre antiquarks.

Una de las posibles consecuencias de que la regla de conservación del número de quarks no se cumpla es que el protón podría descomponerse en raras ocasiones en partículas más ligeras (figura 2). Una de las posibles formas de desintegración del protón sería transformarse en un positrón y un mesón pi neutro (π^0), es decir, con carga eléctrica nula. Los *mesones* son partículas subatómicas formadas por un quark y un antiquark. La violación del número de quarks se debe a que de los tres quarks que había en el protón no queda ninguno, ya que el positrón es un lepton y el número neto de quarks en el mesón π^0 es cero. Los mesones son inestables y se transforman espontáneamente en otras partículas: en el caso del mesón π^0 el resultado de su desintegración son dos fotones de rayos gamma. En cuanto al positrón resultante de la hipotética desintegración de un protón, su destino es desintegrarse con un electrón en cuanto se encuentre con uno, dando lugar a dos fotones de rayos gamma. Por tanto, el efecto neto de la desintegración de un protón sería que un protón y un electrón se transformarían en cuatro fotones de rayos gamma, así que si

FIG. 2



Desintegración beta del neutrón y desintegración hipotética del protón. Un neutrón consta de dos quarks down (d), con carga $-1/3$ de la del electrón, y un quark up (u), con carga $+2/3$, y se desintegra en un protón cuando uno de sus quarks d se transforma en un quark u emitiendo un bosón W^- , que luego se desintegra en un positrón (e^+) y un antineutrino ($\bar{\nu}_e$). La desintegración del protón en un positrón y un mesón π^0 (compuesto de un quark u y un antiquark \bar{u}), decayando luego en dos fotones, puede requerir la existencia de partículas hipotéticas como la $\gamma^{+1/3}$ y la $X^{-4/3}$.

es cierto que la ley de conservación del número de quarks no se conserva, en un plazo de tiempo muy dilatado toda la materia ordinaria debería acabar transformándose en fotones.

Se puede tratar de medir el plazo de tiempo que requiere en promedio un protón para desintegrarse examinando simultáneamente un número muy grande de ellos, para lo cual basta observar una cantidad grande de materia. Como la desintegración de partículas elementales es un proceso estadístico, no todos los protones duran el mismo tiempo, suponiendo que efectivamente se desintegren: en cualquier muestra muy grande de materia se deberían estar produciendo desintegraciones a un ritmo muy pausado y cuanto mayor sea la muestra menor es el tiempo que habrá que esperar para observar la desintegración de un protón. El experimento más reciente llevado a cabo sobre este tema (y otros relacionados) es el experimento SuperKamiokande, en Japón, en el cual se observan de forma continua 50 000 toneladas de agua ultrapura, lo que equivale a unos 10^{34} protones. El resultado obtenido es que la *semivida* del protón debe ser mayor que 10^{33} años. Por semivida se entiende el plazo de tiempo que es necesario esperar para que de un número muy grande de protones la mitad de ellos se desintegre. Si el protón es una partícula absolutamente estable, su semivida sería infinita. Como en ningún experimento se puede medir una cantidad infinita, sino tan solo poner una cota inferior a su valor, el resultado del experimento SuperKamiokande no debe interpretarse como una confirmación de la desintegración del protón, sino como un límite inferior a su semivida, que muy bien pudiera ser infinita. Por esta razón la desintegración del protón no se considera un fenómeno probado, así que su importancia en el futuro del universo es motivo de controversia.

¿Y DESPUÉS QUÉ PASARÁ?

Si son ciertos los fenómenos de los que hemos hablado en este capítulo, el resultado es que dentro de un plazo de tiempo grandísimo, muchísimas veces mayor que la edad actual del univer-

so, toda la materia de este acabará desapareciendo. En la tabla de esta página se resumen, en orden cronológico, los eventos principales pronosticados de la historia futura de la materia en el universo. Una parte acabará siendo engullida por agujeros negros y devuelta en forma de radiación electromagnética. La que sobreviva a este destino acabará desapareciendo conforme sus protones y neutrones se desintegren en otras partículas más ligeras. El resultado será un universo formado solo por fotones (los fotones que en su día emitieron las estrellas y los que queden del fondo cósmico de microondas) y quizás por los electrones que no se hayan encontrado con los positrones surgidos de la desintegración de los protones. Dos historias diferentes pueden pasar a partir de entonces: la primera es que la gravedad acabe por detener la expansión del universo y vuelva a reunir todo el espacio y su contenido en una especie de gran implosión final que puede que marque el comienzo de un nuevo universo. La segunda historia es que la expansión continúe por siempre y el contenido del universo esté cada vez más y más enrarecido, hasta que quizás algún fenómeno exótico dé lugar a un nuevo universo. Para poder discutir cuál de los dos caminos diferentes parece estar siguiendo la evolución del universo es necesario investigar las características de este a grandes escalas.

Evento	Tiempo (años)
Presente del universo	$13,8 \cdot 10^9$
Fin de la formación estelar	$\sim 5 \cdot 10^{10}$
Se apagan las últimas estrellas	10^{13}
Tiempo mínimo para el decaimiento orbital de una galaxia	10^{24}
Se desintegran los protones y neutrones de la materia ordinaria que no se ha incorporado a agujeros negros	10^{34}
Evaporación de los agujeros negros de origen estelar (masa < 10 masas solares)	10^{70}
Evaporación de los agujeros negros del centro de las galaxias	10^{85}

El futuro del universo

En cada cúmulo de galaxias, las galaxias, gas y estrellas que lo forman están ligados gravitatoriamente, así que cada cúmulo sigue su destino de una forma bastante independiente de lo que pasa en el resto del universo. Por este motivo, nuestra narración quedaría incompleta si no se describiesen los futuros cambios en el universo visto a escalas mayores que cualquier agrupación de materia.

Para estudiar el universo a gran escala vamos a considerar distancias mucho más grandes que el tamaño de cualquier agrupación de galaxias. Vimos en el primer capítulo que los cúmulos de galaxias tienden a formar filamentos que pueden llegar a los mil millones de años-luz de longitud, así que en este, cada vez que nos imaginemos una porción del universo, nos estaremos refiriendo a volúmenes con un tamaño lineal superior a esta cifra. Recordemos que las galaxias más lejanas que podemos observar están ahora mismo a unos 28 000 millones de años-luz de nosotros, así que podríamos pensar que el universo se nos queda pequeño si lo dividimos en trozos de ese tamaño. Sin embargo, esos 28 000 millones de años-luz representan solo el universo observable. El tamaño del universo es muy probablemente mucho más grande que este último, así que una distancia de unos mil millones de años-luz posiblemente solo represente una porción muy pequeña de él. Tal es el número de galaxias en el universo observable que una porción de un tamaño algo mayor de mil millones de años-luz puede considerarse ocupada por un gas en el que las «moléculas» serían las galaxias. La densidad de este gas sería muy baja: como ya dijimos en el primer capítulo, la densidad

media de la materia ordinaria en el universo es de $\rho_B = 3,8 \cdot 10^{-31}$ g/cm³, donde se ha escogido el subíndice «B» porque la materia ordinaria se llama también materia bariónica. Otra diferencia entre el gas de galaxias y un gas normal es que la presión del primero es cero. Dentro de cualquier gas ordinario, como el aire que respiramos, existe una cierta presión. Dicha presión se debe a que sus moléculas están en movimiento unas con respecto a otras y colisionan entre sí y con cualquier superficie sólida que limite con el gas. Las galaxias del «gas de galaxias» que estamos imaginando se mueven unas con respecto a otras igual que las moléculas de un gas, pero las colisiones entre ellas se producen con una frecuencia tan baja que podemos considerar que la presión que resulta de esas colisiones es nula.

Aparte del gas de galaxias, podemos considerar otro gas formado por la materia oscura. Como la distribución espacial de las galaxias refleja las concentraciones de materia oscura, si las galaxias se pueden imaginar como un gas, la materia oscura también, en este caso con una densidad de $\rho_D = 2,09 \cdot 10^{-30}$ g/cm³, con el subíndice «D» haciendo referencia a la palabra inglesa *dark* (oscura). Este gas de materia oscura tampoco ejerce ninguna presión, pues ya dijimos que sus partículas no ejercían ninguna otra influencia que no fuera la gravitatoria.

Por último, el tercer componente que vamos a imaginar como un gas es la propia radiación electromagnética. Puede parecer raro considerar la luz como un gas, pero esta y otras formas de radiación electromagnética están formadas por fotones, que la mecánica cuántica trata como partículas. Tiene por tanto sentido considerar la radiación electromagnética como un gas de fotones. En la actualidad, la mayor parte de los fotones de este gas no han sido emitidos por las estrellas, sino que son fotones del fondo cósmico de microondas. En todo caso, su densidad es más baja que la del gas de galaxias y el gas de materia oscura, con $\rho_R = 4,7 \cdot 10^{-34}$ g/cm³, y con el subíndice «R» haciendo referencia a la radiación. El valor de ρ_R está relacionado con la densidad de energía electromagnética en el universo, que de acuerdo con la equivalencia entre masa y energía vale $\rho_R c^2$. El gas de fotones sí tiene una presión P_R según la mecánica cuán-

tica; la demostración está fuera de lugar aquí, pero su valor es $(1/3)\rho_R c^2$, donde c es la velocidad de la luz. Como la velocidad de la luz es un número tan grande, pudiera parecer que la presión del gas de fotones es enorme. No es así, porque la densidad del gas de fotones es minúscula. El valor resultante para la presión es de $1,41 \cdot 10^{-14}$ Pa, que es un valor un millón de veces menor que el de los mejores vacíos que se pueden conseguir en un laboratorio.

Como la materia, tanto la bariónica como la oscura, se conserva conforme el universo se expande, sus respectivas densidades ρ_B y ρ_D van disminuyendo. La densidad se define como masa entre volumen ocupado: si el volumen V que ocupa una determinada cantidad de materia aumenta, la densidad de esta tiene que disminuir de forma proporcional al inverso del volumen, es decir, como V^{-1} . La densidad del gas de fotones disminuye de forma más rápida, como $V^{-4/3}$, o dicho de otro modo, la densidad del gas de fotones disminuye más deprisa que la de la materia al expandirse el universo. La diferencia de comportamiento se debe a que las partículas de materia no se ven afectadas por la expansión del universo; por ejemplo, el tamaño de un átomo de hidrógeno no cambia debido a dicha expansión, mientras que la longitud de onda de cada fotón del gas de fotones sí aumenta en la misma proporción que lo hace el tamaño del universo debido a ello. Veamos ahora a qué conclusiones llegamos con esta versión simplificada de los contenidos del universo.

CAMBIOS EN LA EXPANSIÓN CÓSMICA

En el primer capítulo mencionamos que es razonable suponer que la tasa a la que el universo se expande era mayor en el pasado porque la atracción gravitatoria entre galaxias tiende a ralentizar la expansión del universo. Podemos saber cuánto se ha expandido el universo desde un determinado instante en el pasado a partir del desplazamiento al rojo z de la luz que nos llega de galaxias lejanas. El desplazamiento al rojo de la luz depende de la razón entre la longitud de onda λ_0 de un fotón cuando fue

emitido y la longitud de onda λ de ese mismo fotón cuando lo recibimos. Dijimos que:

$$1 + z = \frac{\lambda}{\lambda_0}.$$

Como la longitud de onda del fotón ha aumentado a lo largo de su trayecto en la misma proporción que lo ha hecho el tamaño del universo, si medimos para una galaxia lejana un desplazamiento al rojo de, por ejemplo, $z = 2$, eso significa que ese tamaño se ha multiplicado por tres desde que el fotón salió de la galaxia de la que procede hasta que ha llegado a nosotros. Si somos capaces de medir la distancia a la que se encontraba la galaxia con $z = 2$ cuando se emitió la luz, se puede calcular cuánto tiempo ha tenido que viajar esta para llegar hasta aquí y cuánto tiempo hace que el tamaño del universo era un tercio del actual.

Las medidas de distancia necesarias para determinar los cambios en la tasa de expansión del universo no pueden hacerse usando la ley de Hubble, porque el valor de la constante de Hubble depende de la tasa de expansión del universo, que es precisamente lo que queremos encontrar. Un método alternativo para medir distancias nos lo proporciona el uso de *candelas estándar*. Una candela estándar es una clase de objetos que sabemos que tienen todos ellos una luminosidad similar. Para el caso que nos ocupa la candela estándar son las explosiones de *supernova de tipo Ia*. Este tipo de explosiones ocurre cuando una estrella enana blanca tiene una estrella compañera cercana que le proporciona un aporte continuo de gas que hace crecer su masa. Una enana blanca se mantiene en equilibrio con su propia gravedad gracias a la presión con la que los electrones de su materia se oponen a la acción compresiva de la gravedad. Pero la presión que pueden ejercer los electrones tiene un límite que se alcanza cuando la masa de una enana blanca supera unas 1,4 veces la masa del Sol. En ese momento, la estrella entera estalla en una gigantesca explosión como si fuera una enorme bomba de fusión. Al estar bien definida la masa máxima de una enana

blanca, las supernovas de este tipo son bastante parecidas entre sí, lo que implica que tienen aproximadamente la misma luminosidad. A partir de la intensidad del brillo de la supernova visto desde la Tierra podemos determinar la distancia a la galaxia en la que se encuentra, de un modo parecido a cómo en una noche oscura podemos hacernos una idea de lo lejos que está un barco de la costa por la intensidad con la que vemos brillar sus luces.

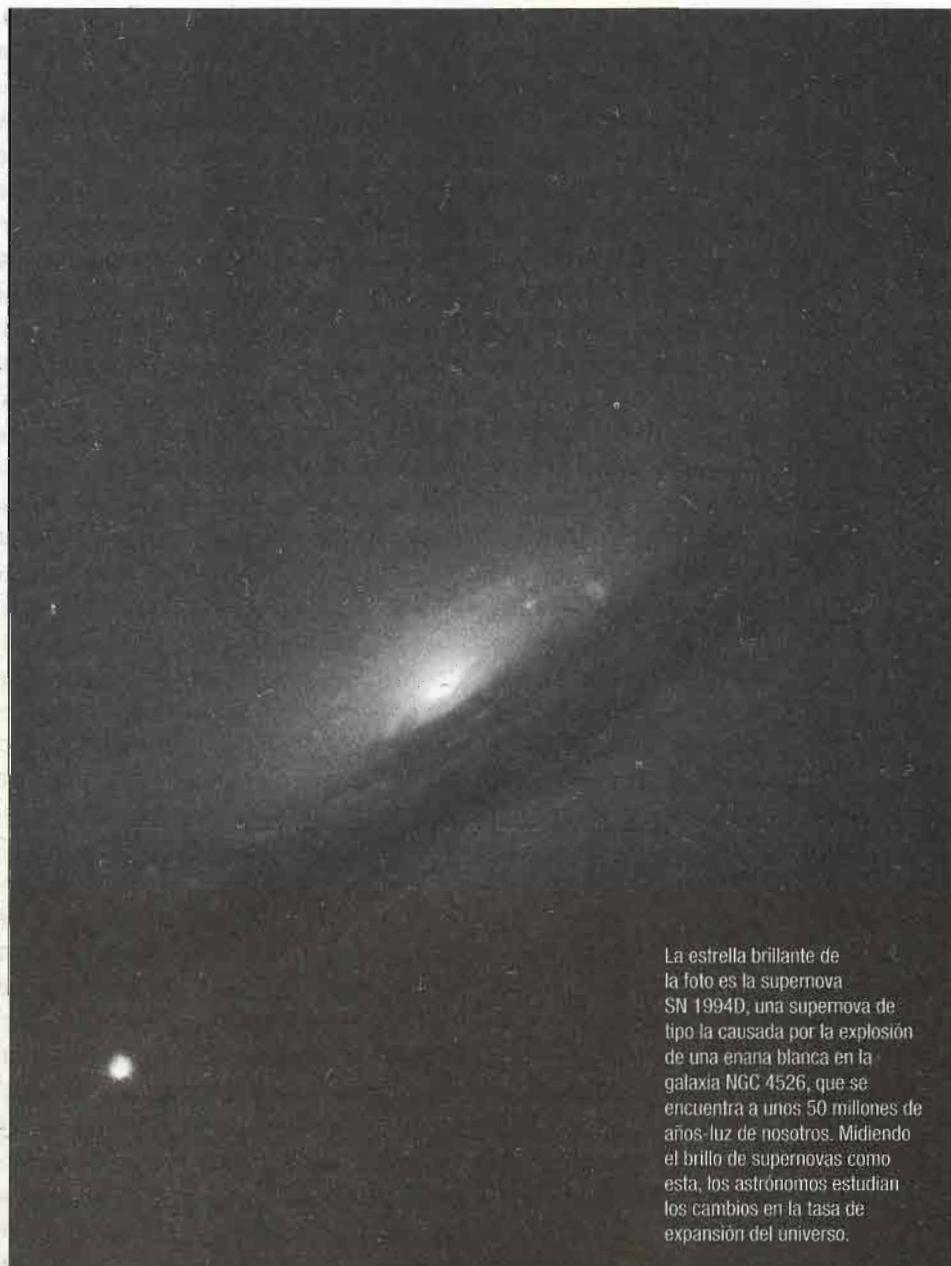
Conocidos el valor del desplazamiento al rojo z y de la distancia a galaxias lejanas (las más alejadas en las que se pueden observar explosiones de supernova tienen valores del desplazamiento al rojo z entre 1 y 2) se puede saber si la expansión del universo ha ocurrido a tasa constante o ha ido disminuyendo con el tiempo. Si la tasa de expansión del universo decrece con el tiempo, las supernovas con un desplazamiento al rojo dado (por poner un número, con $z=2$) están más cerca de nosotros de lo que correspondería si el universo se hubiera expandido a tasa constante. Pues bien, lo que se encontró después de hacer estas mediciones fue que, para un desplazamiento al rojo determinado, las supernovas están más lejos de lo que correspondería si el universo se hubiese expandido a tasa constante, es decir, que la expansión del universo se ha acelerado por lo menos desde la época en la que la luz salió de esas supernovas en su viaje hacia nosotros: para un desplazamiento al rojo de $z=2$ eso corresponde a unos 10 000 millones de años en el pasado y a una distancia en el momento presente respecto a la galaxia en la que estalló la supernova de unos 17 000 millones de años-luz.

Veamos ahora si con un modelo de universo en el que solo existe materia (ordinaria y oscura) y radiación somos capaces de encontrar una explicación a la aceleración de su expansión. Si consideramos una galaxia lejana a una distancia d de nosotros, según la ley de Hubble se alejará de la Tierra a una velocidad $v=Hd$, donde H es la constante de Hubble. Como ya hemos dicho, la distancia d tiene que ser una distancia de escala cosmológica, mayor que los mil millones de años-luz que representa

Nunca pienso en el futuro. Viene demasiado pronto.

ALBERT EINSTEIN

el tamaño de las mayores estructuras del universo. Por un lado, todo el «gas» de materia ordinaria, materia oscura y radiación que hay entre nosotros y esa galaxia ejerce una atracción gravitatoria sobre ella que tiende a hacer disminuir la velocidad v con la que se aleja de nosotros. La atracción gravitatoria de ese gas es proporcional a la masa total de gas M contenida en una esfera de radio d centrada en nosotros e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia d que nos separa de la galaxia en cuestión, es decir, la atracción gravitatoria es proporcional a M/d^2 . La masa M se puede encontrar multiplicando la densidad del gas ρ por el volumen de la esfera, que es proporcional a d^3 ; el resultado es que la atracción gravitatoria es proporcional a ρd . Sin embargo, el resultado que hemos obtenido no es completo: en relatividad general la presión de un gas también genera gravedad. Esto es debido a que cuando un gas está a una cierta presión almacena energía, cosa que podemos comprobar cuando hinchamos un flotador con una bomba de pie: parte del trabajo que hacemos queda almacenado como energía en el aire comprimido dentro del flotador. Como a toda energía le corresponde una masa ($E = mc^2$), a la presión de un gas también le corresponde una masa que genera gravedad, de hecho, a una presión P le corresponde una masa equivalente igual a P/c^2 . Cuando se hacen las cuentas según la relatividad general resulta que la atracción gravitatoria que experimenta la galaxia lejana que estamos considerando es proporcional a $d(\rho + 3P/c^2)$. El factor 3 que multiplica a la presión aparece durante los cálculos para llegar al resultado y se puede interpretar como que una presión es más eficiente generando atracción gravitatoria que una densidad de materia. Nosotros no sentimos nunca este efecto porque las presiones y las densidades que nos rodean son tales que P/c^2 es siempre mucho menor que la densidad. Por hacer la comparación, la densidad media de la Tierra es de unos 5500 kg/m^3 y se estima que la presión en su centro es unos tres millones y medio de veces mayor que la presión atmosférica. Para esa presión P/c^2 equivale a unos cuatro miligramos por metro cúbico. Con esos números, queda claro que la presión en el interior de la Tierra solo contribuye en una fracción ínfima a la gravedad te-



La estrella brillante de la foto es la supernova SN 1994D, una supernova de tipo Ia causada por la explosión de una enana blanca en la galaxia NGC 4526, que se encuentra a unos 50 millones de años-luz de nosotros. Midiendo el brillo de supernovas como esta, los astrónomos estudian los cambios en la tasa de expansión del universo.

rrestre. De hecho este resultado es generalizable y constituye la razón fundamental por la que hemos supuesto que la presión debida a la materia, ya sea ordinaria u oscura, es nula: excepto en situaciones realmente extremas para la materia el valor de P/c^2 es siempre muchísimo menor que la densidad. En resumen, a la atracción gravitatoria que unas regiones del universo ejercen sobre otras contribuyen las densidades de materia (ordinaria y oscura) y radiación, y la presión debida a la radiación.

Lo importante del caso es que tanto la densidad neta ρ como la presión P son cantidades positivas, así que la atracción gravitatoria resultante es positiva y tiende a reducir la velocidad con la que se aleja de nosotros la galaxia. Podría pensarse que la presión del gas que está dentro de la esfera de radio d empuja a la galaxia lejos de nosotros, pero como hay gas tanto dentro como fuera de esa esfera, el efecto neto es nulo: el empuje sobre la galaxia del gas que está dentro de la esfera equilibra el empuje del que está fuera de ella. En conclusión, para poder explicar la expansión acelerada del universo necesitamos admitir que existe en el universo otro componente con el que no hemos contado y con tal combinación de valores de la densidad de energía y la presión que hace que la combinación de $\rho + 3P/c^2$ sea negativa para que su presencia produzca repulsión gravitatoria. Ese componente es la energía oscura.

LA ENERGÍA OSCURA

Hay que admitir que el nombre de energía oscura parece escogido para estimular la imaginación, pero no está exento de justificación. El adjetivo «oscura» que comparte con la materia oscura viene de la característica también compartida de que, sea cual sea su naturaleza, no interacciona con la radiación electromagnética; pero ¿por qué hablar de energía?

En el primer capítulo mencionamos que los astrofísicos son capaces de calcular las densidades de materia (ordinaria y oscura) que existían en las etapas tempranas del universo y que esas densidades se corresponden bastante bien con las que se

miden en el actual, así que, por decirlo en términos figurados, no queda sitio en los modelos teóricos para otro tipo de materia que no sea la ordinaria y la oscura. Además, por lo que sabemos, la materia se caracteriza por que su densidad ρ y su presión P en estado gaseoso toman siempre valores positivos. Aquí, por «materia» entendemos también la formada por antipartículas. La densidad de la materia formada por antipartículas (la llamada *antimateria*) es asimismo positiva, porque se ha comprobado experimentalmente en laboratorios que estas experimentan la gravedad terrestre igual que sus correspondientes partículas. En cuanto al signo positivo de la presión, significa que para mantener una cierta cantidad de materia en estado gaseoso en un volumen dado, debe haber algo que ejerza una fuerza hacia el interior de dicho volumen. Como ρ y P son positivos en la materia, $\rho + 3P/c^2$ es siempre positivo para ella. De ahí que un componente del universo con $\rho + 3P/c^2$ negativo tenga que ser energía. Ahora bien, ¿qué escogemos con valor negativo, la densidad, la presión o ambas? La respuesta depende del origen que se propone para la energía oscura. La mayoría de las propuestas tienen en común que, de una forma o de otra, crear espacio (o más exactamente espacio-tiempo) vacío requiere una determinada cantidad de energía. La causa concreta de esa energía depende de cada propuesta teórica. Se puede razonar, por poner un ejemplo, que como el espacio vacío está lleno de partículas virtuales (de las que ya hablamos en el capítulo anterior al discutir la posible evaporación de los agujeros negros), su existencia, si bien efímera, tiene un coste energético que tenemos que aportar para crearlo. Como ninguna teoría acierta a dar el valor de la densidad de energía oscura que se deduce de la aceleración de la tasa de expansión del universo, no nos entretendremos en los argumentos físicos de las diferentes teorías: nos basta con admitir que el valor de la densidad correspondiente a la energía oscura ρ_v tiene que ser positivo si queremos constatar que para crear espacio vacío hace falta energía. Aunque hablamos de energía, el símbolo ρ_v hace referencia a una densidad de materia, es decir, a un valor en kilogramos por metro cúbico; usando la equivalencia entre masa y energía el valor de la densidad de

MASAS EN RELATIVIDAD GENERAL

La ley de la gravitación universal de Newton nos dice que la atracción gravitatoria F que una masa M , como por ejemplo la Tierra, ejerce sobre otra m , como por ejemplo un satélite artificial, es proporcional al producto de ambas masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia R que las separa:

$$F = G \frac{Mm}{R^2}$$

La constante G es la constante de gravitación universal. Aunque las masas M y m juegan un papel simétrico en la fórmula anterior, físicamente su papel es muy diferente. La masa M , la de la Tierra en el ejemplo de la figura 1, es la responsable de que exista un campo gravitatorio a su alrededor y se la llama *masa gravitatoria*. La masa m , la del satélite en el ejemplo, se ve afectada por el campo gravitatorio. La manifestación física de este efecto es que su movimiento se aparta de uno rectilíneo a velocidad constante: el satélite da vueltas en torno a la Tierra. La desviación del movimiento rectilíneo uniforme se interpreta como la existencia de una fuerza F que actúa sobre la masa m . A la masa m se la llama *masa inercial*. La cuadrícula representa el espacio alrededor de la Tierra.

La presión como generadora de gravedad

En la física clásica, la distinción entre masa gravitatoria y masa inercial es una mera formalidad, pues ambas se consideran iguales. Sin embargo, en relatividad general la diferencia es importante, ya que cualquier forma de energía presente en un cuerpo contribuye tanto a la masa gravitatoria como a la inercial y además en distintas proporciones para cada una de ellas. Si sustituimos en el ejemplo anterior la Tierra por una nube de gas con una cierta presión P (figura 2), la gravedad que genera esta procede tanto de la densidad del gas ρ como de la energía almacenada en él debido a que la presión P no es nula, así que la presión contribuye a la masa gravitatoria de la nube. Fijémonos en que ya no hemos pintado una fuerza actuando sobre el satélite. En relatividad general, la gravedad no es una fuerza, sino un cambio en la curvatura del espacio-tiempo que hemos representado curvando las líneas de la cuadrícula alrededor de la nube. Si el gas estuviera a una temperatura distinta del cero absoluto, también habría que incluir otra contribución a la masa gravitatoria debido al calor almacenado en él.

El vacío y la gravedad

Por último, si sustituimos el satélite artificial por otra nube de gas más pequeña (figura 3), la presión de esta contribuye asimismo a su masa inercial, pero la contribución es diferente que si lo hiciera a la masa gravitatoria. En cuanto al vacío, si decimos que $P = -\rho c^2$, nos aseguramos de que este posee una densidad de masa gravitatoria, es decir, contribuye a la atracción gravitatoria que unas partes del universo ejercen sobre otras, pero no posee masa inercial, o en otras palabras, el vacío no siente la gravedad.

FIG. 1

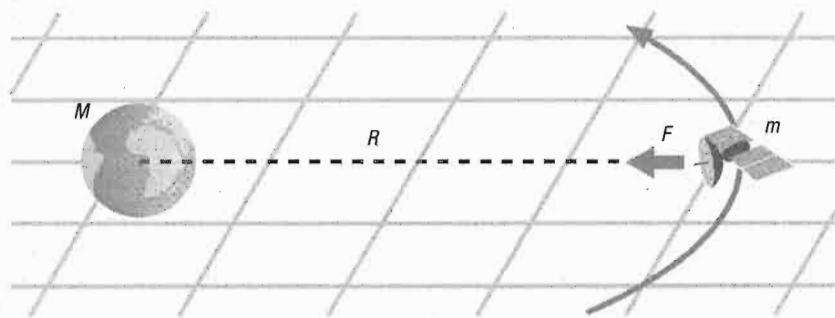


FIG. 2

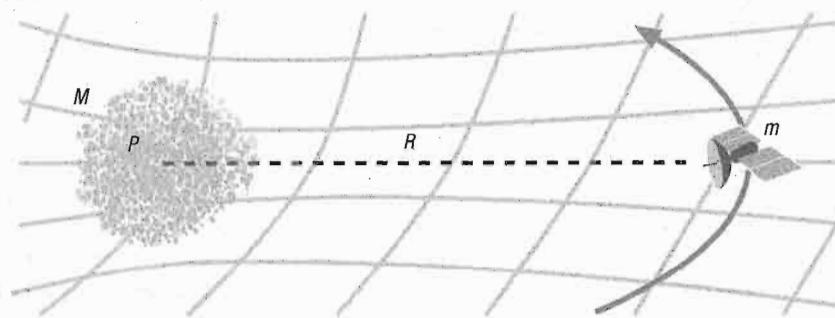
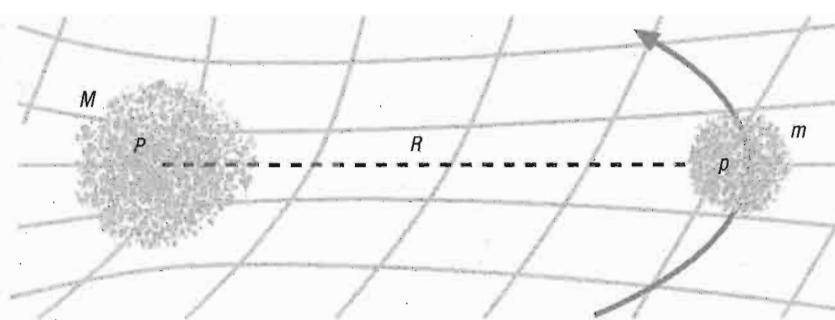


FIG. 3



energía correspondiente a la energía oscura sería $\rho_v c^2$, de modo que nos haría falta una cantidad de energía $\rho_v c^2$ para crear un metro cúbico de espacio vacío. El subíndice «v» hace referencia al vacío, ya que suponemos que la energía oscura es una energía asociada al espacio vacío.

Puesto que hemos acordado que ρ_v tenga signo positivo, para que $\rho_v + 3P_v/c^2$ tenga signo negativo es necesario que la presión P_v de la materia oscura tenga un valor negativo. Un valor negativo de la presión en un medio material que ocupa un cierto volumen indica que hay que hacer una fuerza hacia afuera de ese volumen para que el medio no se contraiga sobre sí mismo. Esta situación se da por ejemplo en una membrana elástica que se mantiene tirante sujetándola por sus bordes. Según esta analogía el espacio vacío se comportaría de una forma similar a una membrana en tensión, aunque por supuesto el espacio no tiene bordes desde los que se lo pueda sujetar. Dado que suponer un signo negativo para P_v no viola ninguna ley física, no debemos tener ningún reparo en aceptarlo. Ahora tenemos que proponer cuánto vale P_v comparado con ρ_v si queremos hacer alguna predicción. La propuesta que hacemos se basa en el siguiente razonamiento: como a una presión P_v le corresponde una densidad equivalente de materia P_v/c^2 , la densidad equivalente de materia total en el espacio vacío será $\rho_v + P_v/c^2$. Si queremos que el espacio vacío esté «lo más vacío posible», aunque tenga una presión y una densidad de energía, hemos de hacer que la densidad equivalente de materia total sea cero, es decir, hacer que $P = -\rho_v c^2$. De este modo en el espacio vacío la densidad equivalente de materia total es cero (porque $\rho_v + P_v/c^2 = 0$), haciendo este una contribución negativa a la atracción gravitatoria entre unas regiones del universo y otras (porque $\rho_v + 3P_v/c^2 < 0$).

UN CIELO CADA VEZ MÁS VACÍO

Ya que hemos acordado la relación entre presión y densidad para la energía oscura, podemos evaluar las contribuciones que hacen las densidades de materia ordinaria, materia oscura, radia-

ción y energía oscura a la atracción gravitatoria que unas partes del universo ejercen sobre las otras, retomando el ejemplo de la galaxia lejana que estaba a una distancia d de nosotros. Cada componente del universo ejerce una atracción gravitatoria sobre ella proporcional a $d(\rho + 3P/c^2)$. Como la presión que ejercen la materia ordinaria y la oscura es nula, las contribuciones que ambas hacen a la atracción gravitatoria sobre esa galaxia son $d\rho_B$ y $d\rho_D$, respectivamente. Para la radiación $P_R = (1/3)\rho_R c^2$, así que la atracción gravitatoria ejercida por la radiación es proporcional a $2\rho_R$. Para la energía oscura, $P_v = -\rho_v c^2$, así que la atracción gravitatoria que ejerce la materia oscura es proporcional a $-2d\rho_v$. El que esta última contribución salga negativa indica que se trata de una repulsión y no de una atracción propiamente dicha. En el primer capítulo dijimos que las densidades de materia ordinaria, materia oscura, radiación y energía oscura estaban en el momento presente en las siguientes proporciones: un 68% de energía oscura, un 27% de materia oscura, un 5% de materia ordinaria y un 0,005% de radiación electromagnética. Con ellas, la repulsión debida a la energía oscura es mayor que la atracción gravitatoria debida al resto de los componentes del universo y es la causa de la aceleración en la tasa de expansión cósmica, admitiendo por supuesto que sean ciertas todas las suposiciones que hemos hecho sobre el comportamiento de la energía oscura.

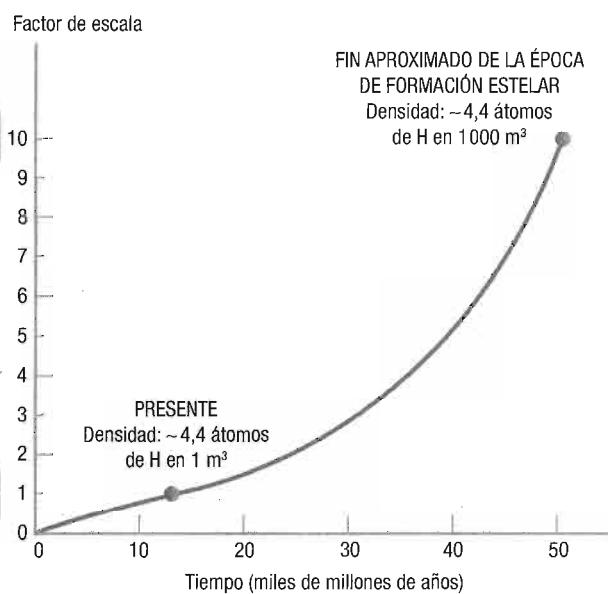
Aunque la expansión cósmica se esté acelerando en el presente, ¿cabe esperar que en algún momento del futuro se ralentice hasta detenerse? La respuesta no se puede dar con total seguridad hasta que se separen el origen y las propiedades de la energía oscura. Bajo los supuestos que hemos hecho sobre ella, su densidad ρ_v es una constante, pues $\rho_v c^2$ sería la cantidad de energía necesaria para crear una unidad de volumen de espacio vacío y ese valor debería ser independiente de la época del universo en la que nos encontremos. Si estamos en lo cierto, conforme el universo se expande las densidades de materia y radiación disminuyen pero la densidad de energía oscura permanece constante, con lo que la importancia relativa de la repulsión debida a la energía oscura aumenta con respecto a la atracción gravitatoria debida a la materia y la radiación.

El resultado es que la tasa de expansión del universo aumenta cada vez más deprisa (figura 1), quizá hasta el punto de hacerlo exponencialmente.

El crecimiento de la tasa de expansión del universo hace que con el paso del tiempo disminuya el número de galaxias que podemos ver desde la nuestra. Recordemos que en el primer capítulo se dijo que la ley de Hubble predecía que las galaxias que ahora mismo distan un radio de Hubble se alejan de nosotros a la velocidad de la luz, y que la luz que emitan a partir de ahora ya nunca nos alcanzará. En realidad, esta última afirmación depende de los cambios en la tasa de expansión del universo, ya que el radio de Hubble R_H es la velocidad de la luz c entre el valor de la constante de Hubble H , ($R_H = c/H$), y la constante de Hubble depende de la tasa de expansión del universo. Por ejemplo, si la constante de Hubble disminuye con el tiempo, como lo hizo en las etapas iniciales de la historia del universo, el radio de Hubble aumenta con el tiempo y una galaxia que en una época pasada no era visible desde nuestra región puede ser visible en otra época más reciente, si la distancia que nos separa de ella crece más despacio que el radio de Hubble. Pero, por el contrario, si el radio de Hubble crece más despacio que las distancias entre galaxias debido a la expansión cósmica, cada vez más y más galaxias ahora visibles para nosotros dejarán de serlo en el futuro y cada vez recibiremos la luz de un menor número de ellas. De hecho, una vez que el efecto repulsivo debido a la energía oscura predomina sobre la atracción gravitatoria de la materia y la radiación, la velocidad de alejamiento de las galaxias no decrece por efecto de la gravedad, sino que aumenta, lo que conlleva que el radio de Hubble no puede aumentar al ritmo necesario para compensar la expansión del universo. Los astrónomos de un futuro muy lejano contarán con pocas galaxias lejanas que estudiar.

Al principio de este capítulo hicimos la puntualización de que las distancias que consideraríamos serían mayores que el tamaño de las mayores estructuras del universo, consistentes en filamentos de cúmulos de galaxias. ¿Llegará la expansión acelerada del universo hasta el punto de desbaratar estas estructuras, los cúmulos de galaxias que las componen y las galaxias propiamen-

FIG. 1



Para medir el tamaño del universo se suele usar el factor de escala, que mide la distancia relativa entre objetos lejanos que no estén ligados gravitatoriamente entre sí, tomando como base la distancia actual. Cuando cese completamente la formación de nuevas estrellas en el universo, la distancia entre objetos lejanos se habrá hecho diez veces mayor que su valor actual, y la densidad de la materia ordinaria en el universo, que hoy equivale a unos cuatro átomos de hidrógeno cada metro cúbico, se habrá hecho mil veces menor. En la figura puede apreciarse cómo el crecimiento del factor de escala del universo se acelera a partir del presente.

te dichas? La respuesta, al menos para las galaxias y los cúmulos de galaxias, es que probablemente no. La repulsión gravitatoria de la energía oscura es dominante en volúmenes muy grandes, pero el valor de la densidad asociada a la energía oscura ($7,03 \cdot 10^{-30} \text{ g/cm}^3$) es tan pequeño que en las regiones del universo donde la materia se encuentra agrupada, como las galaxias y los cúmulos galácticos, la atracción gravitatoria de la materia supera a la repulsión debida a la energía oscura. A efectos de la expansión cósmica, las galaxias y los cúmulos galácticos representan objetos ligados gravitatoriamente que la expansión del universo no puede deshacer.

En este aspecto, los hipotéticos habitantes de nuestra galaxia en un futuro muy, muy lejano pensarán, al igual que los astrónomos del siglo xix, que nuestra galaxia y aquellas vecinas con las que esté ligada gravitatoriamente (como la galaxia de Andrómeda) constituyen todo el universo que existe y que más allá solo hay espacio vacío. Pero al contrario que los astrónomos del siglo xix, no contarán con ningún indicio de que sus ideas son incorrectas pues no podrán recibir ninguna luz u otro tipo de señal del resto del universo. Además, esos hipotéticos habitantes vivirán en una galaxia moribunda, donde cada vez queden menos estrellas que brillen en su cielo. En el próximo capítulo hablaremos sobre si es posible que la vida en el universo persista hasta entonces.

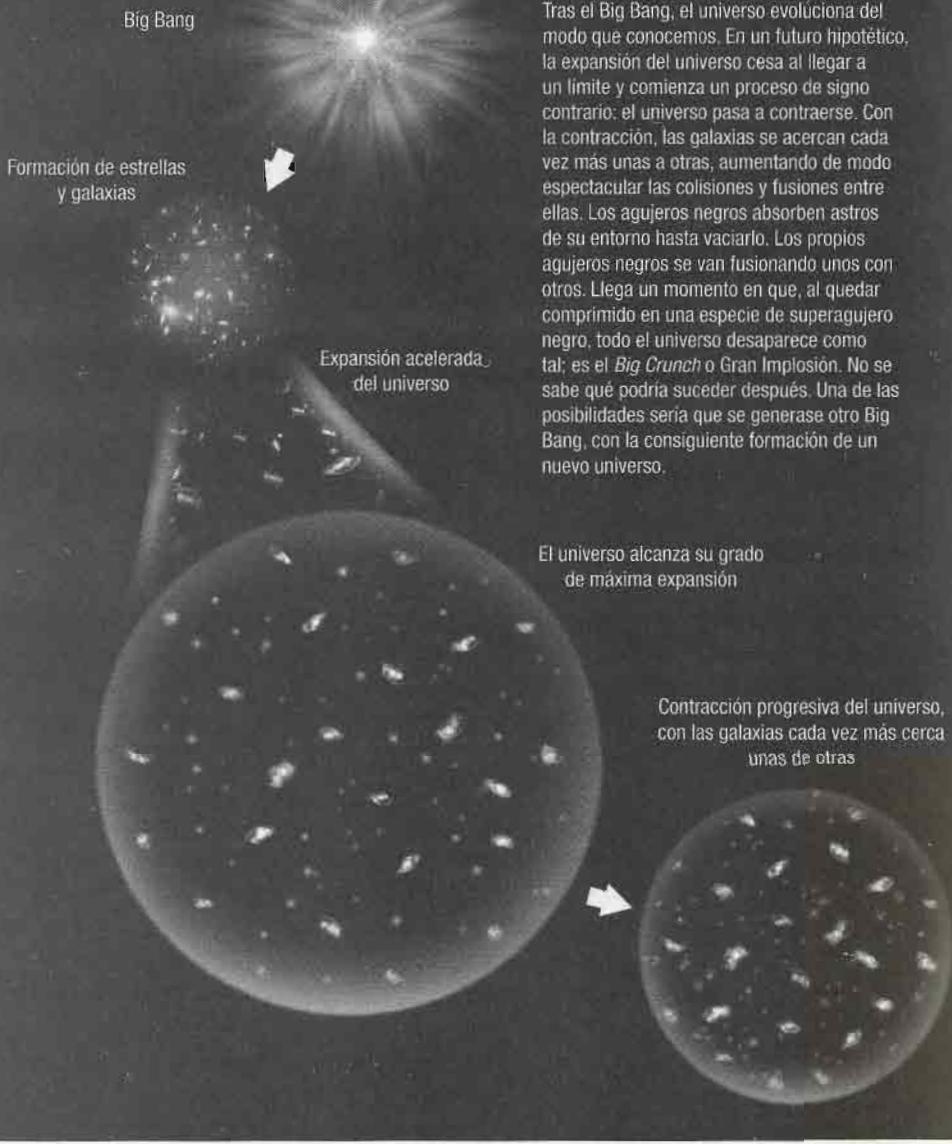
¿HABRÁ OTRO UNIVERSO?

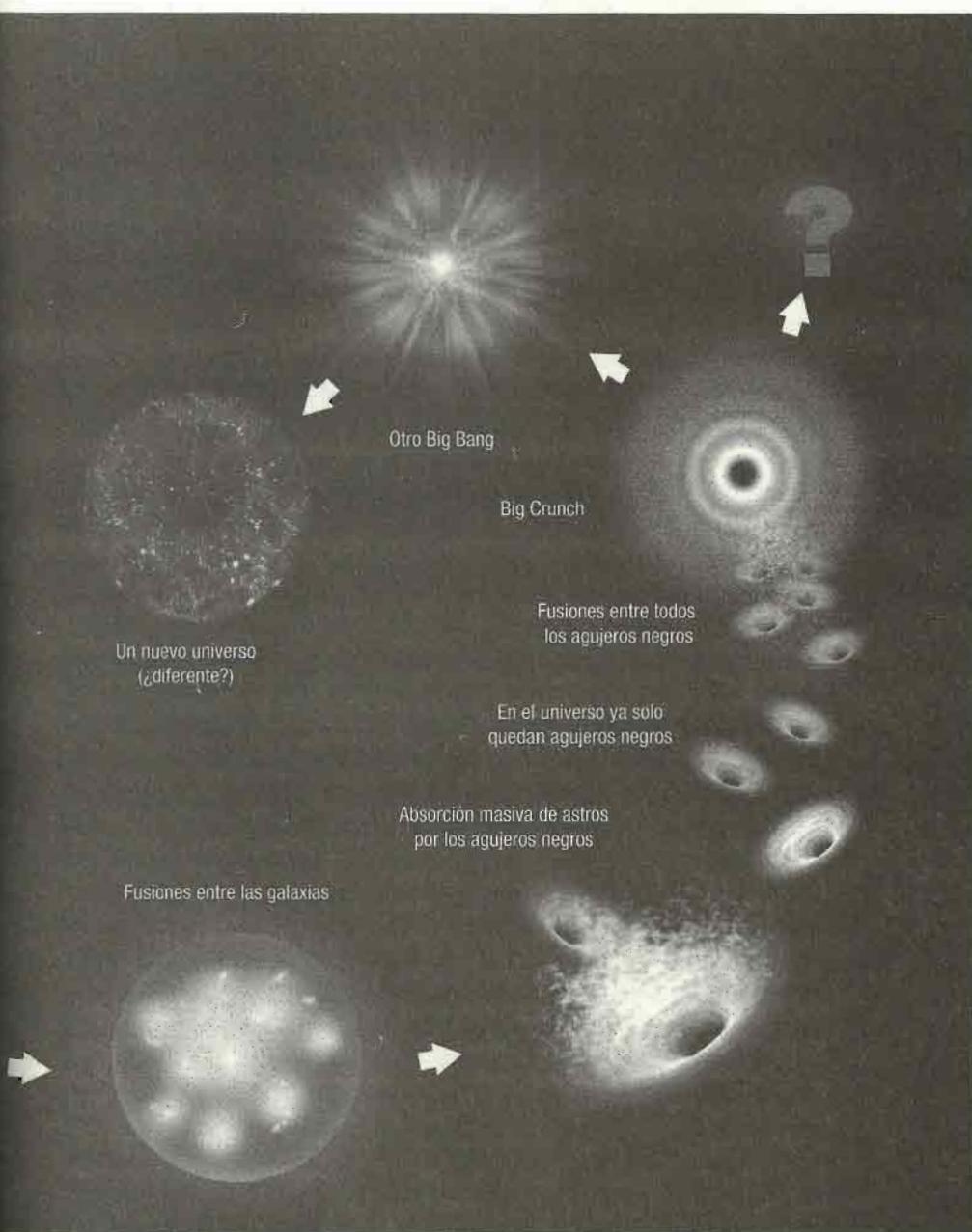
Hasta el descubrimiento de la aceleración de la tasa de expansión del universo a finales del siglo xx, uno de los temas de investigación principales en cosmología era determinar si este era cerrado o abierto, lo que en ausencia de energía oscura depende de la densidad de materia. La idea era la siguiente: si la densidad de materia en el universo supera cierto valor umbral, que llamaremos *densidad crítica*, entonces la atracción gravitatoria que unas partes de él ejercen sobre las otras es capaz de retardar poco a poco su expansión hasta llegar a un momento en el futuro en el que esta se detenga y se convierta en una contracción en la que las distancias entre distintas regiones del universo disminuyan en lugar de aumentar como ocurre ahora. Si se diera este caso, e insistimos, no existiera la energía oscura, el universo sería *cerrado*. Quiere esto decir que el volumen total del universo sería finito, sin que existiera ninguna frontera que limitara su volumen. En un hipotético universo cerrado, una imaginaria nave espacial que emprendiera un viaje en línea recta mucho más deprisa que la luz acabaría volviendo al punto de partida. Una analogía bidimensional la tenemos en la superficie de la Tierra: su valor es finito, no tiene ningún borde y si volamos en línea recta, sea cual

sea la dirección que tomemos, volveremos al punto de partida. La idea de un universo cerrado es intelectualmente atractiva por dos razones. La primera es que evita dar un valor infinito al tamaño del universo. Un universo de tamaño infinito plantea ciertos problemas: por poner un ejemplo algo rebuscado, puesto que cualquier combinación de átomos y moléculas, por rara e improbable que sea, tiene siempre la probabilidad de volver a ocurrir en un universo infinito, suponer que lo es implica que no se puede descartar la posibilidad de que en otra parte del universo haya un ser igual al lector sosteniendo un libro igual a este, algo que a muchos nos resultará perturbador. El segundo atractivo de la idea de un universo cerrado es que su contracción final resulta en una Gran Implosión o Big Crunch (véase la imagen de las págs. 134-135) en la que se vuelve a contar con una concentración elevadísima de materia y radiación a una temperatura muy alta, es decir, el universo vuelve a unas condiciones parecidas a las de la Gran Explosión (Big Bang) inicial. Así que un universo cerrado da también una posible respuesta al origen del universo: el Big Bang es quizá un rebote tras un Big Crunch anterior, aunque quede en el aire explicar cómo se pudo producir ese rebote.

Las mediciones que se han realizado hasta ahora para determinar la densidad de materia del universo han arrojado un valor inferior a la densidad crítica. De hecho, estos estudios sirvieron para probar la existencia de la materia oscura. Un universo en el que no hay energía oscura y la densidad de materia es igual o inferior a la crítica es un universo *abierto*. En un universo de este tipo, en un instante dado del tiempo, su volumen es infinito y una nave espacial imaginaria que viajara en línea recta nunca volvería al punto de partida. Un universo abierto puede ser *plano*, si la densidad de materia es igual a la crítica, o *hiperbólico*, si la densidad de materia es menor a la crítica. En ambos casos, el adjetivo plano o hiperbólico hace referencia a la curvatura del universo. Podemos entender el significado de la curvatura a través de la relación entre superficie y volumen de una esfera (figura 2). En un universo plano, si consideramos una esfera de radio R , su volumen V viene dado por $4\pi R^3/3$ y su superficie S por $4\pi R^2$, de modo que la relación de volumen a superficie es

UNA DE LAS POSIBLES FORMAS EN QUE PODRÍA OCURRIR EL BIG CRUNCH





$V/S=R/3$. En un universo hiperbólico, encontraríamos que para una esfera V/S es menor que $R/3$ y que la diferencia es más notable cuanto mayor es el radio de la esfera. Como mención, en un universo cerrado (véase de nuevo la figura 2), para una esfera V/S es mayor que $R/3$ siempre que el radio R sea bastante menor que el tamaño del universo. Puesto que la suma de las densidades de la materia ordinaria y la oscura no alcanza el valor crítico, antes del descubrimiento de la energía oscura, los datos de la densidad de materia del universo apuntaban a que el universo era abierto e hiperbólico.

El descubrimiento de la energía oscura hace que el problema de distinguir entre un universo cerrado o abierto y en expansión perpetua o con una Gran Implosión en el futuro sea más complicado que en un universo formado solo por materia. La densidad de energía oscura se ha de sumar a las densidades de la materia ordinaria y de la materia oscura a la hora de determinar si la densidad total supera la densidad crítica. Pero como la energía oscura causa que unas partes del universo repelan a las otras, es posible un universo cerrado en expansión perpetua. De todos modos, los valores conocidos en la actualidad de las densidades de materia y energía oscura apuntan a que vivimos en un universo plano que experimenta una expansión acelerada que nunca se detendrá, así que nunca habrá una Gran Implosión.

¿Significa esto que nuestro universo es el único que ha existido y existirá? Aquí empezamos a entrar en el terreno de la especulación, pero pudiera ser que no. Los argumentos a favor de la posible formación de nuevos universos se apoyan en la existencia de la energía oscura. Dijimos que esta puede interpretarse como la energía que cuesta crear un volumen de espacio vacío porque este espacio «vacío» está lleno de partículas virtuales, pero esa no es la única explicación posible para su origen. En mecánica cuántica, las partículas pueden entenderse como excitaciones de un campo asociado a ellas. El caso más familiar son los fotones, que pueden entenderse como excitaciones del campo electromagnético. Las otras tres interacciones fundamentales de la naturaleza, que son la interacción nuclear fuerte, la interacción débil y la interacción gravitatoria, también tienen

FIG. 2



Universo cerrado

Universo abierto plano

Universo abierto hiperbólico

Si el universo tuviera solo dos dimensiones espaciales, sus posibles geometrías se corresponderían con las superficies de la figura. Un ser bidimensional podría determinar el tipo de geometría de su universo midiendo la relación entre el área $S(\pi R^2)$ y el perímetro $L(2\pi R)$ de un círculo de radio R . En un universo bidimensional abierto plano, $S/L = R/2$; en un universo bidimensional cerrado, $S/L > R/2$; y en un universo bidimensional abierto hiperbólico $S/L < R/2$. Nosotros, que vivimos en un universo con tres dimensiones espaciales, podemos determinar la geometría de nuestro universo por el mismo procedimiento, midiendo la relación entre el volumen de una esfera de radio R y el volumen que contiene, suponiendo que R es una distancia comparable al tamaño del universo.

asociados campos. Las excitaciones de estos campos son asimismo partículas que podemos detectar, salvo en el caso de la interacción gravitatoria, para la que podemos notar el campo (lo hacemos cada vez que levantamos un peso) pero cuya partícula asociada, el gravitón, nunca se ha detectado. Las partículas que forman la materia, como los quarks o los electrones, también pueden ser consideradas excitaciones de campos asociados.

En física un campo es una propiedad de cada punto del espacio: podemos imaginarnos que en cada uno de esos puntos hay un conjunto de «cajones», cada uno asociado a un campo, y que en cada cajón se guarda un valor. Cada campo almacena energía, de modo que en cada punto del espacio hay almacenada una energía que depende de los valores de todos los campos en ese punto. Asimismo, cada campo tiene un estado fundamental en el que su energía es mínima. Las partículas, al ser excitaciones de su campo asociado, representan estados en los que este tiene una energía mayor a la fundamental. El principio de indeterminación se aplica también a los campos; de hecho otra posible

forma de interpretar la existencia de partículas virtuales es que si nosotros pudiéramos asegurar que no existen partículas en una determinada región del espacio, sabríamos que en ella todos los campos están en el estado fundamental, cosa que el principio de indeterminación nos prohíbe.

El quid de la cuestión está en que la energía del estado fundamental de un campo no es medible: solo podemos detectar un campo por las excitaciones que se producen en él, así que solo somos capaces de medir la diferencia de energía entre el nivel excitado de un campo y el estado fundamental del campo. Por poner un ejemplo con el campo electromagnético, una carga eléctrica crea un campo eléctrico distinto de cero a su alrededor en el que hay almacenado una energía, pero solo podemos medir la diferencia de energía entre la almacenada en el campo eléctrico cuando la carga está presente y la almacenada en él cuando la carga está ausente. El lector puede argumentar que si el campo eléctrico es cero en ausencia de la carga la energía debe ser nula también, pero lo cierto es que las leyes del electromagnetismo funcionan igual de bien si suponemos que la energía asociada al valor cero del campo es una constante distinta de cero. Sabiendo esto, podemos llamar *energía del vacío* a la suma de las energías de todos los campos en el estado fundamental en un volumen unidad. La energía del vacío pudiera ser lo mismo que la energía oscura, si bien nadie de momento ha demostrado que esto sea cierto.

La posibilidad de, literalmente, crear nuevos universos a partir de la nada surge del hecho de que la energía del estado fundamental de algunos de los campos depende de las masas de algunos tipos de partículas y la intensidad con la que estas interaccionan entre sí. En la mecánica cuántica, las masas de las partículas dependen del valor de un campo llamado *campo de Higgs*. Este tiene una peculiaridad que lo distingue de los otros: es el único que en el espacio vacío toma un valor distinto de cero. Del valor del campo de Higgs en el vacío depende la masa de todas las partículas y por tanto también la energía del vacío. Si la energía oscura es la energía del vacío quizás para otros valores del campo de Higgs en el vacío la energía del va-

cío tome un valor menor que el que tiene en nuestro universo. En términos físicos, esa situación se describe diciendo que el espacio vacío de nuestro universo sería un «falso vacío», mientras que la situación en la que la energía del vacío es menor representaría el «vacío verdadero». Uno de los principios de la física es que todos los sistemas físicos, si se los deja evolucionar libremente, tienden a su estado de menor energía. De ser cierto que existe otro valor del campo de Higgs que da lugar a una menor energía del vacío, el cambio de ese valor debería producirse espontáneamente, salvo que haya barreras que ese cambio tenga que vencer para poder ocurrir. Tales barreras existen: un cambio en el valor del campo de Higgs en el vacío daría lugar a un espacio-tiempo diferente de aquel en el que nos encontramos

y en el que las leyes físicas se comportarían de forma distinta a como lo hacen en nuestro universo, un fenómeno que en física se llama *decaimiento del vacío*, para expresar el hecho de que el espacio pasa de estar en una situación de «falso vacío» a otra de «vacío verdadero». El cambio, de producirse, no se daría en todo el espacio a la vez, sino en un punto o, más bien, una región muy pequeña de nuestro espacio. El nuevo espacio-tiempo resultante sería como una burbuja dentro de nuestro espacio-tiempo, y si bien su formación implica una liberación de energía debida a la disminución de la energía del vacío, también necesita de un aporte de energía que se almacena en la frontera entre el nuevo espacio-tiempo y el nuestro. Si el volumen del nuevo espacio-tiempo formado es pequeño, el aporte de energía en la frontera es mayor que la energía liberada en el volumen, y la formación de la burbuja de nuevo espacio-tiempo no es energéticamente favorable. A partir de cierto volumen de nuevo espacio-tiempo, la liberación de energía en el volumen supera el costo energético de la frontera. Cuando se llega a esta situación la frontera entre ambos espacio-tiempos se expande conforme nuestro espacio-tiempo decae al nuevo espacio-tiempo en el que la energía del vacío es menor. En determinadas condiciones

Hay muchos mundos y sistemas de universos existiendo al mismo tiempo, todos ellos perecederos.

ANAXIMANDRO

el exceso de energía liberado podría dar lugar a la formación de nuevas partículas de materia, es decir, al nacimiento de un nuevo universo.

La barrera que impide el decaimiento de nuestro espacio-tiempo a otro diferente es, por un lado, la necesidad de que el cambio de uno a otro deba tener lugar en un volumen mínimo, y por otro, el hecho de que los valores de la energía del vacío correspondientes al «falso vacío» y al «vacío verdadero» están separados por una barrera de energías más elevadas cuya probabilidad de ser atravesada espontáneamente se supone que es baja. Ni el volumen mínimo ni la probabilidad de que se produzca el decaimiento se pueden calcular por el momento: sencillamente no sabemos lo suficiente sobre el comportamiento del espacio y el tiempo a las escalas relevantes para este problema, pero del hecho de que nuestro universo tenga 13 800 millones de años podemos deducir que estos fenómenos, si ocurren, no deben ser muy frecuentes, o de lo contrario nuestro universo no hubiera podido alcanzar tal edad. De todos modos, si físicamente el decaimiento del vacío es posible, la formación de una o más burbujas con un nuevo espacio-tiempo solo es cuestión de tiempo. Además, la propia expansión del universo hace que la formación de una burbuja de nuevo espacio-tiempo sea un evento cada vez más probable, pues hay cada vez más espacio en el que puede haber un decaimiento del vacío.

El universo habitable

La vida es a la vez frágil y tenaz. Frágil porque solo puede darse cuando se reúnen ciertas condiciones poco usuales, y tenaz porque una vez que ha conquistado un lugar, puede moldearlo y adaptarse a los cambios para mantenerse en él el mayor tiempo posible. Aun así, el intervalo temporal en el que puede existir vida en el universo tiene también su fin.

La ciencia que estudia la posible existencia de vida en otros lugares del universo se llama *astrobiología*. El principal problema al que se enfrentan los astrobiólogos es que solo cuentan con un ejemplo para estudiar las posibles condiciones en las que puede surgir y mantenerse: la vida en el planeta Tierra. Los biólogos están bastante seguros de que la vida en nuestro planeta procede de un ancestro común, así que puede ocurrir que la de otros lugares del universo, de existir, sea muy diferente de la terrestre. En primer lugar, su correspondiente organismo progenitor no tiene por qué parecerse a los que aparecieron en la Tierra. Además, la evolución de la vida terrestre ha cambiado de curso en varias ocasiones por circunstancias totalmente aleatorias, como pasó con la extinción de los dinosaurios debido a un impacto cometario, circunstancias que no tienen por qué haberse repetido en otros lugares del universo donde exista vida. Aun así, del hecho de que tenga que cumplir ciertas limitaciones impuestas por las leyes de la física y la química y que estas sean las mismas en todo el universo, podemos hacernos una idea de las condiciones generales que son necesarias para su existencia, desde cuándo algunas de sus regiones cumplen estas condiciones y hasta cuándo lo harán.

NECESIDADES QUÍMICAS DE LA VIDA

La primera condición general para la vida es la existencia de una química lo suficientemente compleja. Los animales y las plantas contienen un número enorme de compuestos químicos diferentes, cada uno cumpliendo al menos una misión dentro del organismo. Parece pues razonable suponer que existe un mínimo de complejidad química necesaria para que exista la vida, o en otras palabras, que un organismo vivo no puede estar constituido por un conjunto reducido de compuestos químicos. Además, los que se encuentran en un ser vivo deben de estar formados a su vez por un número pequeño de elementos químicos, pues de otro modo sería muy difícil para él construir los que necesita a partir de otros que le sobran o aquellos que toma de otros organismos (como los animales) o el medio ambiente (como las plantas). En el caso de la Tierra, los elementos químicos más abundantes en los seres vivos son el carbono, el hidrógeno, el oxígeno, el nitrógeno, el fósforo y el azufre. Con la excepción del oxígeno, estos elementos no son los más frecuentes en la corteza terrestre, así que su abundancia en los seres vivos tiene que estar motivada por unas propiedades químicas peculiares.

La peculiaridad es evidente en el caso del carbono, ya que es el elemento químico que sirve de esqueleto de las moléculas que forman la vida. Los otros compuestos químicos mencionados se suelen agregar a este esqueleto para dar a la molécula de la que forman parte las propiedades que necesita para cumplir su función en el organismo. La capacidad del carbono para combinarse consigo mismo no es igualada por ningún otro compuesto químico, por lo que existe un acuerdo prácticamente unánime en que, de existir vida en el resto del universo, debe estar basada en él. Es cierto que el silicio, un elemento químico de la misma familia que el carbono, también es capaz de formar un gran número de moléculas y de combinarse con otros muchos elementos. Sin embargo, es poco probable que exista vida basada en silicio en otros lugares del universo por varias razones que se apoyan entre sí. La primera es que los compuestos de silicio basados en un esqueleto de átomos de este elemento, unidos directamente

unos a otros, son bastante inestables, lo que les hace poco adecuados como sustento de la vida. Sí existen compuestos en los que el silicio forma cadenas, las *siliconas*, pero en ellas el patrón del esqueleto se basa en átomos de silicio unidos por átomos de oxígeno, siguiendo la disposición Si-O-Si. Esto hace pensar que la vida basada en silicio, de existir, debe aparecer en un ambiente en el que haya abundancia de oxígeno. Pero el silicio, en presencia de oxígeno, tiende a formar dióxido de silicio, SiO_2 , que en su forma más abundante conocemos como cuarzo. El SiO_2 es uno de los sólidos con un punto de fusión más elevado (1 713 °C) y además es bastante insoluble en la mayoría de los solventes más comunes, por lo que podemos suponer que en cualquier ambiente en el que exista vida el cuarzo será sólido. En este estado, el SiO_2 no puede participar en un ciclo biológico en el que pase de forma inorgánica (en el medio ambiente) a orgánica (dentro de un hipotético ser vivo) a escalas planetarias, como ocurre con el CO_2 en la Tierra, que al ser un gas se distribuye rápidamente por toda la atmósfera y los océanos.

Otra condición que podemos considerar como general para la existencia de vida es la presencia de un disolvente en el que tengan lugar las reacciones químicas que la constituyen. La razón es que para ella es fundamental que dichas reacciones ocurran con una rapidez suficiente como para adaptarse a los cambios que se producen en el entorno, y la mayoría de las reacciones químicas ocurren más rápidamente cuando las moléculas que reaccionan están en disolución. En este caso las moléculas son libres para moverse y colisionar unas con otras, y algunas de esas colisiones dan lugar a reacciones químicas entre las moléculas involucradas. En el caso de la vida en la Tierra el disolvente es el agua, lo que explica la abundancia de hidrógeno y oxígeno en los seres vivos terrestres. En el caso de la hipotética vida en otros lugares del universo, el disolvente podría ser otra sustancia, aunque es lógico suponer que esta debería ser simple, formada por átomos razonablemente comunes en el universo y capaz de disolver la mayor parte de los compuestos de carbono que se conocen. Sustancias como el amoníaco, el metano u otros hidrocarburos han sido propuestas en ocasiones como posibles candidatas.

No discutiremos aquí la viabilidad de un organismo que use amoníaco o metano como disolvente en el que mantener su metabolismo: lo importante es que requerir un disolvente en fase líquida impone de forma general la necesidad de que la presión y la temperatura se mantengan dentro de un rango de valores que no suele ser demasiado amplio, sobre todo para la temperatura. Por ejemplo, a 1 atmósfera de presión el agua solo existe como líquido entre los 0 y los 100 °C, y el amoníaco entre -77 y -33 °C. Este hecho no solo limita el rango de condiciones ambientales en el que es posible encontrar vida sino que implica que esta solo puede crecer en entornos muy estables, donde los valores de la temperatura y la presión se mantengan dentro de las condiciones en las que el disolvente en el que se basa la vida está en fase líquida durante períodos de tiempo razonablemente largos.

Es difícil decir cómo de largo es «razonablemente largo»: en el caso de la vida terrestre, existen fósiles de organismos vivos con 3500 millones de años de antigüedad e indicios de vida en rocas de hasta 3800 millones de años. La Tierra tiene unos 4500 millones de años, así que no es descabellado pensar que la vida apareció en ella tan pronto como se dieron las condiciones adecuadas para albergarla, una vez que nuestro planeta se enfrió lo suficiente como para que los primeros océanos pudieran condensarse. Sin embargo, los organismos pluricelulares no aparecieron hasta hace unos 600 millones de años. Eso significa que a la vida en la Tierra le llevó unos 3000 millones de años alcanzar el nivel de complejidad de organismos como los corales y las esponjas, a partir de la vida unicelular. Quizá en otros lugares del universo su complejidad haya crecido más rápidamente, pues no sabemos a qué accidentes que pudieron retrasar su evolución se enfrentó la vida en la Tierra en sus primeros 3000 millones de años de existencia. Para concretar ideas, nos arriesgaremos a suponer que la vida, en sus formas más simples, aparece allí donde existen las condiciones para que prospere en períodos de tiempo geológicamente cortos, del orden de millones o decenas de millones de años, mientras que necesita miles de millones de años para alcanzar formas complejas.

NECESIDADES FÍSICAS DE LA VIDA

La tercera condición general para que exista la vida es la disponibilidad de una fuente de energía. Los seres vivos la necesitan para llevar a cabo muchas de las reacciones químicas de las que depende su existencia, y al menos una parte de ella acaba transformándose en calor que es utilizable por otros seres. Por tanto, los seres vivos necesitan de una fuente de energía de alta calidad y de un sumidero térmico que reciba el calor que ellos disipan. Como energía de alta calidad se entienden aquellas formas que pueden usarse para crear compuestos químicos más complejos a partir de otros más simples. En el caso de la Tierra, el Sol es la fuente de energía de alta calidad y la fotosíntesis es el proceso por el cual se generan compuestos químicos complejos usando la energía de la luz solar. Existen indicios de que la capacidad de hacer fotosíntesis es tan antigua como la vida en la Tierra, si bien los primeros organismos fotosintéticos no producían oxígeno porque en lugar de fijar el dióxido de carbono (CO_2), reduciéndolo mediante el hidrógeno obtenido a partir de moléculas de agua (H_2O), como hacen las plantas actuales, usaban otros compuestos que también contenían hidrógeno, como el sulfuro de hidrógeno (SH_2). La capacidad de hacer fotosíntesis usando otros compuestos diferentes del agua apoya la posibilidad de que si la vida en otros lugares del universo usa otros disolventes distintos del agua, también pueda tener capacidad fotosintética. Por otro lado, el hecho de que la fotosíntesis y la vida en la Tierra aparecieran simultáneamente parece apoyar la necesidad de que esta última tenga a su disposición una fuente de energía relativamente ubicua, como lo es la luz solar. Ciertamente existen en la Tierra ecosistemas que dependen muy poco o nada de la luz solar, como los que se encuentran alrededor de fumarolas volcánicas en las profundidades abisales. Sin embargo, esas comunidades de organismos viven bajo la amenaza del agotamiento de la fuente de energía local de la que dependen, así que podemos sacar la conclusión de que para que exista vida es necesario un suministro abundante de energía luminosa.

El universo es asimétrico y estoy convencido de que la vida, tal y como la conocemos, es un resultado directo de la asimetría del universo o de sus consecuencias indirectas.

Louis Pasteur

En cuanto al calor producido por los seres vivos, este se disipa hacia el espacio junto con el calor de la propia Tierra que resulta de la energía que llega del Sol. Como el calor fluye de las regiones calientes a las frías, para que exista vida unas partes del universo tienen que estar más calientes que otras, o usando términos físicos, es necesario que el universo

esté fuera del *equilibrio térmico*. De hecho, la luz solar debe su existencia a las altas temperaturas que existen en el interior del Sol. En última instancia, para mantener su metabolismo, todos los organismos de la Tierra aprovechan el flujo de energía que procede de nuestra estrella, que representa un punto caliente local del universo. En este aspecto, no nos diferenciamos demasiado de los organismos que viven alrededor de una fumarola volcánica en el fondo del océano.

Nos queda una última condición que se refiere más a la aparición de la vida que a su subsistencia: la acción de agentes físicos que sean capaces de promover la formación de compuestos químicos complejos a partir de otras sustancias más simples. Para surgir, la vida necesita de la existencia de los compuestos químicos en los que se basa. En el caso de la vida terrestre, estos compuestos son azúcares, aminoácidos, bases nitrogenadas y ácidos grasos. Se supone que antes de la aparición de la vida estos compuestos fueron sintetizados en la Tierra gracias a la acción de los rayos y la luz ultravioleta del Sol, que descomponían las moléculas simples en radicales que podían combinarse para formar moléculas más complejas. Con el ejemplo de la Tierra, parece razonable suponer que la aparición de la vida en otros lugares del universo requiere que en ellos exista un periodo de tiempo en el que actúen agentes físicos capaces de promover reacciones en las que se formen las especies químicas complejas necesarias para ella.

En resumen, para existir y mantenerse, la vida necesita: carbono y otros elementos químicos, principalmente los más lige-

ros, un disolvente y que se mantengan las condiciones de temperatura y presión adecuadas para conservarlo en estado líquido, una fuente de radiación electromagnética capaz de mantener organismos fotosintéticos y un periodo de tiempo en el que actúen agentes físicos que promuevan la formación de radicales que puedan combinarse en moléculas complejas. Veamos en qué regiones del universo pueden darse estas condiciones y hasta cuándo podrán mantenerse.

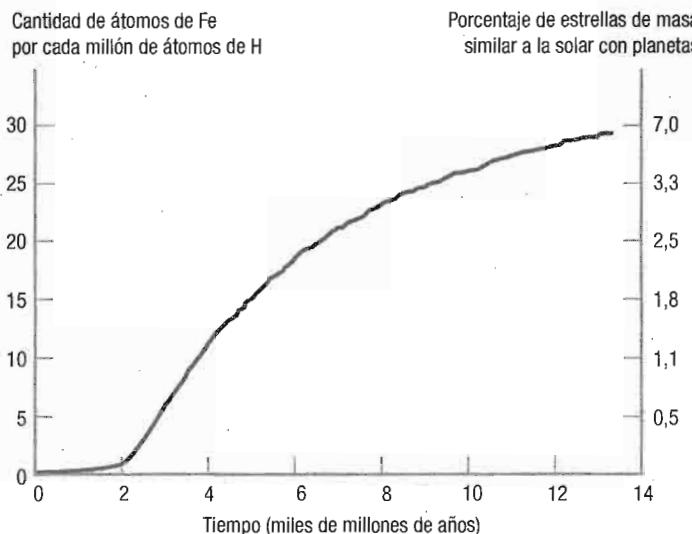
REGIONES HABITABLES DEL UNIVERSO

La necesidad de una fuente de energía estable y de un ambiente en el que pueda existir un medio líquido solo puede darse en un planeta en órbita alrededor de una estrella. Solo en los núcleos de galaxias activas se produce energía en cantidades mucho más abundantes que en ellas. Pero estos núcleos emiten grandes cantidades de rayos X, por lo que es poco probable que algún organismo vivo pueda subsistir en sus proximidades.

En cuanto a los planetas, los hay de dos tipos principales: rocosos como la Tierra o Marte y gaseosos como Júpiter o Saturno. Los planetas gaseosos suelen ser bastante más masivos que los rocosos, por lo que a los planetas como Júpiter se les suele llamar *gigantes gaseosos*. En un gigante gaseoso, la densidad de la materia aumenta de forma continua con la profundidad sin que exista una frontera definida entre una atmósfera y un océano o una superficie sólida como existe en la Tierra. Es muy probable, aunque no tengamos la certeza absoluta, que la vida necesite una superficie sobre la que aparecer, así que para concretar supondremos que la vida solo puede surgir en los planetas terrestres. Aunque estos estén formados en su mayor parte por elementos químicos como el silicio o el hierro, que no se encuentran en grandes proporciones en los organismos vivos, los elementos más importantes para ellos, como el carbono, el hidrógeno y el oxígeno, se hallan entre los más abundantes en el universo, así que no es de esperar que escaseen en los planetas rocosos, como de hecho no escasean en la Tierra.

La condición de tener planetas rocosos en órbita hace que no todas las estrellas sean igualmente apropiadas para mantener vida. La causa está en que no todas tienen la misma abundancia de elementos químicos distintos del hidrógeno y el helio, es decir, la misma metalicidad (figura 1). La composición química de una estrella debe ser similar a la del medio del que se formó, así que si es pobre en elementos químicos diferentes al hidrógeno y el helio eso implica que en el medio en el que se formó había poco material disponible para formar planetas rocosos, ya que estos se forman a partir del mismo material que colapsa gravitatoriamente para formar un cuerpo estelar. En una galaxia espiral como la nuestra, las estrellas del halo tienen una metalicidad mucho más baja que las del disco, por lo que podemos suponer que los planetas rocosos son más comunes entre las estrellas del disco que entre las del halo. Tampoco todas las estrellas del disco son adecuadas para la vida. Muy probablemente todas las galaxias pasan por una etapa en la que sus núcleos son activos, con lo que las estrellas del disco cercanas al núcleo galáctico estarán expuestas durante esa época a unos niveles de rayos X y bombardeo de partículas de alta energía que hagan imposible la aparición de la vida. Quizá ni siquiera una vez que el núcleo galáctico esté quiescente, como en el caso de nuestra galaxia, los niveles de radiación caigan por debajo de aquellos que hacen inviable la vida. Según esto, podemos suponer que existe una zona de habitabilidad que en las galaxias espirales consiste en el disco galáctico exceptuando su parte central. En cambio, en las galaxias elípticas no podemos estar seguros de qué regiones son aptas para la vida: las más grandes tienen estrellas con metalicidades parecidas a las del Sol o mayores, pero como estas galaxias se forman por colisión entre otras más pequeñas, no podemos saber cuáles de esas estrellas estuvieron en el pasado cerca del núcleo de algunas de las que acabaron fusionadas en la galaxia elíptica resultante. En cuanto a las galaxias elípticas más pequeñas, sus estrellas suelen tener una metalicidad bastante menor que la que tiene nuestro Sol y por tanto deberían escasear los planetas de tipo rocoso, semejantes a la Tierra o poco más grandes, en órbita alrededor de ellas.

FIG. 1



La abundancia de hierro (Fe) y otros elementos pesados crece a lo largo de la historia del universo a medida que las estrellas los sintetizan a partir del hidrógeno (H) y del helio (He). Cuanto mayor es la concentración de elementos pesados en el gas del que se forma una estrella de masa parecida a la del Sol, mayor es la probabilidad de que la estrella cuente con planetas. Las probabilidades que aparecen en la derecha de la gráfica han de ser tomadas como valores mínimos, que seguramente se verán corregidos al alza conforme aumente la sensibilidad de las técnicas de detección de planetas. La ralentización en el crecimiento de la abundancia de hierro para tiempos cercanos al presente se debe al decaimiento de la tasa de formación estelar en el universo.

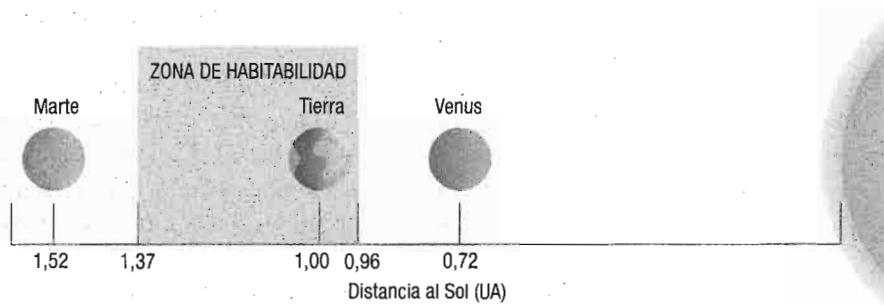
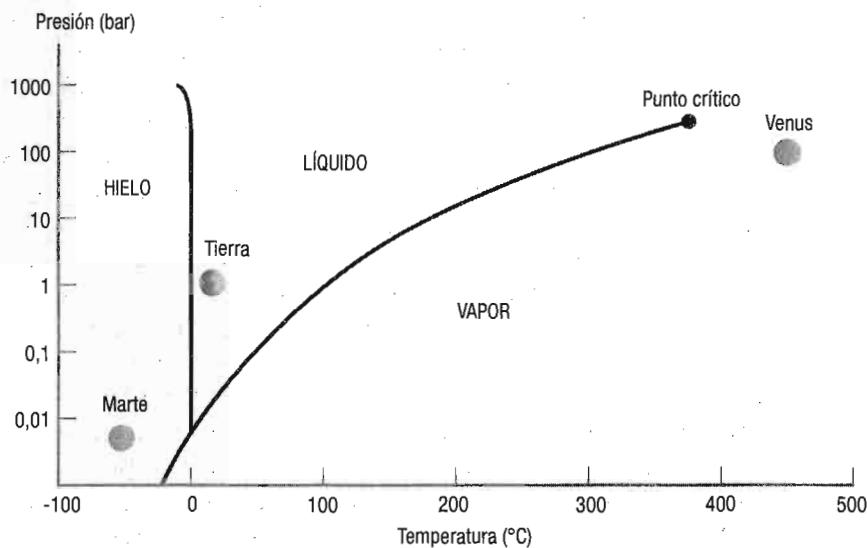
La masa de una estrella también influye en las características de sus posibles planetas, ya que se supone que la cantidad de materia disponible para formar planetas va en proporción a ella. En consecuencia la formación de estrellas de baja masa deja poco material disponible para la formación planetaria. Esto impone un límite inferior, aunque bastante difuso, a la masa que puede tener una estrella para mantener vida. Existe también un límite superior a esa masa, que viene dado por la necesidad de mantener en los planetas en órbita unas condiciones estables durante períodos prolongados de tiempo.

LA ZONA HABITABLE EN TORNO A UNA ESTRELLA

La temperatura que tiene la superficie de un planeta en órbita a una estrella depende principalmente de la distancia entre ambos y de la luminosidad de esta última. Cuanto más lejos está un planeta de la estrella a la que orbita, menor será la temperatura de su superficie. Del mismo modo, cuanto menos luminosa sea la estrella, es decir, cuanto menor sea la cantidad de energía que emite por unidad de tiempo, más frío estará un planeta para una determinada distancia respecto a ella. Alrededor de cada estrella existe una franja llamada *zona de habitabilidad* donde la temperatura de un planeta no es demasiado fría ni demasiado caliente, de modo que puede existir líquido que actúe como disolvente para la vida. Cuánto es ni demasiado frío ni demasiado caliente depende del líquido en cuestión: si suponemos que es agua, las temperaturas serán diferentes de si es amoníaco, por poner un ejemplo. En cualquier caso, la anchura de la zona de habitabilidad de una estrella es grande para las brillantes (las de mayor masa) y pequeña para las más débiles (menor masa). Por dar algunos números, para el Sol, en la actualidad, tras 4 500 millones de años de existencia, la zona de habitabilidad tomando como referencia el agua líquida está situada a entre 0,96 y 1,37 veces la distancia entre la Tierra y el Sol (figura 2). En comparación, para una estrella con el doble de masa que el Sol y 500 millones de años de edad, la zona de habitabilidad está a una distancia de entre 4,3 y 6,2 veces la existente entre la Tierra y el Sol. La diferencia entre los tamaños de ambas zonas de habitabilidad se debe a que una estrella de dos masas solares de la edad mencionada es veinte veces más brillante que la nuestra.

La referencia a la edad de ambas estrellas se debe a que la posición de la zona de habitabilidad cambia con el paso del tiempo. Las recién formadas son más calientes de lo que corresponde a su masa para una estrella madura, pasan después a enfriarse un poco en las etapas iniciales de su existencia y lentamente van haciéndose más calientes y luminosas conforme van agotando el hidrógeno en su interior. El aumento de luminosidad con la edad implica que la zona de habitabilidad va desplazándose a regiones

FIG. 2



En el sistema solar, la temperatura de la superficie de los planetas rocosos aumenta al acercarse al Sol. Si se comparan la temperatura y la presión atmosférica en Venus, la Tierra y Marte con el diagrama de estado del agua, se observa que solo en la Tierra se dan las condiciones para que exista agua líquida, por eso solo la Tierra está dentro de la zona de habitabilidad en torno al Sol. El borde exterior de la misma está a 1,37 unidades astronómicas de distancia del Sol, y el borde interior a 0,96. En Venus no puede existir agua líquida, ya que su temperatura superficial está por encima del punto crítico del agua; a temperaturas por encima del punto crítico el vapor de agua nunca se condensa para formar un líquido. Por el contrario, Marte es demasiado frío y su atmósfera es demasiado tenue, así que en Marte el agua puede existir como hielo o vapor, aunque, al parecer, en condiciones muy peculiares (con alta concentración de ciertas sales en disolución) puede existir en Marte un poco de agua líquida.

CÁLCULO DE LA ZONA DE HABITABILIDAD ESTELAR

Calcular a partir de primeros principios la zona de habitabilidad de una estrella es algo complicado, que requiere bastante potencia de cálculo. En primer lugar es necesario resolver un modelo para una estrella desde su formación hasta el momento en que deja de usar hidrógeno como combustible nuclear. Una vez conocidos la energía que radia la estrella por unidad de tiempo (su luminosidad L) y en qué partes del espectro electromagnético se concentra la energía radiada, es necesario resolver un modelo para la atmósfera del planeta a fin de calcular cuál es la temperatura en su superficie en función de la energía por unidad de tiempo que le llega de su estrella. Para planetas similares a la Tierra, los resultados de estas simulaciones por ordenador pueden ajustarse por fórmulas sencillas. El radio interior r_i y el radio exterior r_{ex} de la zona de habitabilidad de una estrella (ver figura) de luminosidad L vienen dados aproximadamente por:

$$r_i \approx \sqrt{\frac{1}{11L_{\odot}}}, \quad r_{ex} \approx \sqrt{\frac{1}{0,53L_{\odot}}},$$

donde L_{\odot} es la luminosidad del Sol, así que, por ejemplo, para una estrella el doble de luminosa que el Sol, $L/L_{\odot} = 2$. La dependencia de los límites de la zona de habitabilidad con la raíz cuadrada de la luminosidad se debe a que a una distancia r de la estrella, la energía radiada por ella se distribuye uniformemente por una superficie igual a $4\pi r^2$. La luminosidad de una estrella depende fuertemente de su masa. Para una recién formada de masa M comprendida entre 0,7 y 2 masas solares:

$$\frac{L}{L_{\odot}} \approx 0,71 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{4,75},$$

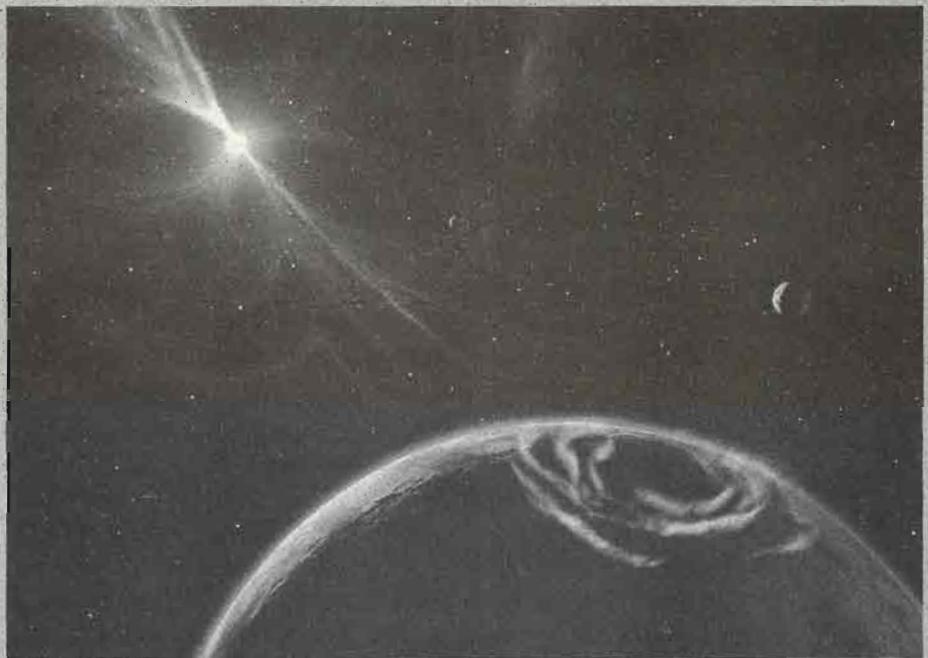
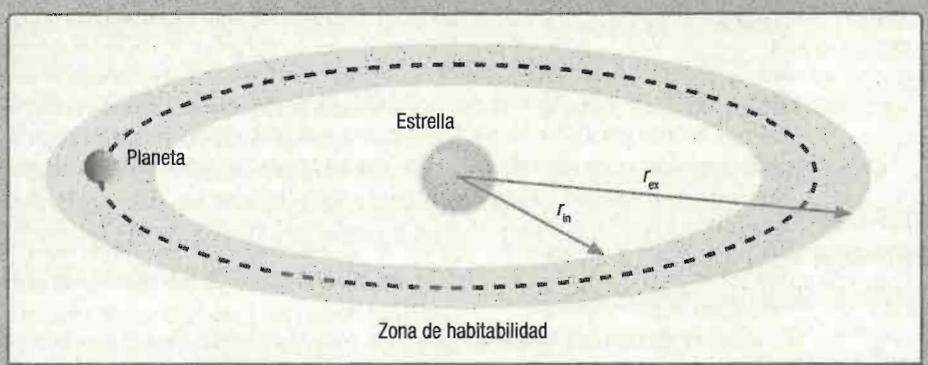
donde M_{\odot} es la masa del Sol. El tiempo que tarda una estrella en agotar su hidrógeno T_H también depende fuertemente de la masa. Para aquellas en el rango de masas mencionado y composición similar a la solar:

$$T_H \approx 12,2 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-3,75},$$

donde el tiempo T_H viene medido en miles de millones de años. Por último, la luminosidad de una estrella aumenta conforme se consume su hidrógeno. La dependencia temporal de la luminosidad de una estrella en el rango que va entre 0,7 y 2 masas solares es:

$$L(T) \approx L \exp[0,969(T/T_H)^{4/3}],$$

donde L es la luminosidad de la estrella recién formada y \exp es la función exponencial.



Es difícil que surja la vida en un sistema solar cuya estrella es de vida corta, pero también que alguna forma de vida pueda sobrevivir a la explosión de tal estrella cuando se convierte en supernova. La imagen es una recreación artística de uno de tales sistemas solares en los que nadie esperaría hallar vida. En este caso, los planetas giran en torno a un pulsar, el cadáver ultradenso de una antigua estrella.

más alejadas de ella mientras va envejeciendo, así que a lo largo de la existencia de una estrella, un planeta que inicialmente estaba en la zona de habitabilidad puede acabar abandonándola conforme su anfitriona envejece. Este es por ejemplo el futuro que le espera a la Tierra, que, según algunos modelos del clima global terrestre y el comportamiento del Sol, dentro de unos 500 millones de años quedará fuera de la zona de habitabilidad solar: nuestro planeta seguirá orbitando a la misma distancia del Sol que ahora, pero este habrá aumentado lo suficiente su luminosidad como para que la Tierra sea tan caliente que no pueda albergar agua líquida.

El desplazamiento de la zona de habitabilidad de una estrella es tanto más rápido cuanto mayor es su masa, ya que el tiempo que tarda esta en consumir su suministro de hidrógeno disminuye muy rápidamente conforme aumenta dicha masa. Esto impone un límite superior de unas dos masas solares a la que puede poseer una estrella para tener planetas en los que pueda surgir vida. El valor exacto de la masa límite depende de lo que tarde en aparecer la vida en un planeta una vez que se forma la estrella que orbita. En el caso de la Tierra, ese tiempo fue de unos mil millones de años, que coincide aproximadamente con el tiempo que una estrella de dos masas solares tarda en agotar su hidrógeno. Un planeta afortunado en torno a una estrella de dos masas solares puede estar todo el tiempo de vida de su anfitriona dentro de la zona de habitabilidad, pero no tener tiempo suficiente para desarrollar vida.

En cuanto al límite inferior de la masa de una estrella que pueda albergar vida, las cuentas no están tan claras. Por un lado, está la condición de que tiene que ser lo suficientemente masiva como para atraer bastante material con el que formar planetas, pero hay otros factores en juego. Las estrellas de masa muy pequeña tienen una zona de habitabilidad muy reducida y muy próxima a ellas. Para un planeta no es muy conveniente estar muy cerca de su anfitriona, aunque sea muy débil, pues puede ocurrir que su rotación sobre su propio eje acabe sincronizándose con el movimiento de traslación. Esta sincronización entre movimiento orbital y rotación es la que hace que la Luna presen-

te siempre la misma cara hacia la Tierra. La causa de la sincronización la hallamos en las fuerzas de marea que el cuerpo más masivo ejerce sobre el menos masivo. Casi todos estamos familiarizados con las mareas que la Luna produce en la Tierra. Estas no involucran solo los océanos terrestres, sino también la propia tierra firme, aunque en los océanos son más evidentes porque la superficie del agua puede deformarse en mayor medida que la superficie de la parte sólida de la Tierra. Las mareas frenan la rotación terrestre alargando poco a poco el día (del orden de milisegundos por siglo). Por su parte, las mareas provocadas en la Luna por la Tierra hace tiempo que frenaron el movimiento de rotación de nuestro satélite visto desde aquí, haciendo que parezca que no gira sobre sí mismo desde nuestro punto de vista, aunque sí lo hace cuando lo vemos desde el Sol. Para un planeta y una estrella la sincronización entre ambos movimientos no tiene siempre que ser a razón de una rotación por órbita: en el caso de Mercurio y el Sol, la sincronización es a razón de tres rotaciones sobre el eje de Mercurio por cada dos órbitas alrededor del Sol. El tiempo que tiene que transcurrir para que un planeta sincronice su rotación con su órbita alrededor de su estrella depende fuertemente de la distancia entre ambos, en concreto, aumenta con la sexta potencia de dicha distancia. Esto hace que los planetas que están cerca de su estrella sincronicen su rotación y movimiento orbital en una fracción muy pequeña de la vida de esta última.

El efecto negativo para la vida de esta sincronización viene de que la duración del día en un planeta depende de la diferencia entre la rapidez con la que este gira sobre sí mismo y la rapidez con la que lo hace alrededor de su estrella. Si dicha diferencia es grande, como ocurre con el caso de la Tierra, la duración del día viene determinada por la rotación del planeta sobre sí mismo. Si el planeta gira sobre su eje con una rapidez comparable a la que gira en torno a su estrella, los días se hacen muy largos, más

El universo está poblado por innumerables soles, tierras y quizá formas de vida. Ese pensamiento expresa la esencia de la revolución copernicana.

ROBERT JASTROW

largos que el periodo orbital del planeta, hasta tener una duración infinita cuando la rotación y el movimiento orbital se sincronizan. Por ejemplo, Mercurio tarda 88 días terrestres en girar alrededor del Sol y 58,7 días terrestres en girar sobre sí mismo: el resultado es que el día de Mercurio, entendido como el tiempo entre dos salidas consecutivas del Sol sobre el horizonte, dura 176 días terrestres. Si en un planeta los días son muy largos, eso significa que hay una enorme variación de temperatura entre el día y la noche, lo que es un inconveniente para los organismos vivos, que deberían entrar en hibernación para sobrevivir a la noche. En el caso extremo de que la sincronización entre rotación y movimiento orbital sea perfecta, un hemisferio del planeta estará permanentemente inmerso en la noche y el otro en el día. Las diferencias de temperaturas resultantes pueden hacer que la atmósfera del planeta se congele en su cara nocturna, dejándolo sin atmósfera e incompatible con la vida.

Si se calcula el tiempo que precisa un planeta con características similares a las de la Tierra para sincronizar su rotación con su movimiento orbital y suponemos que son necesarios al menos mil millones de años para que se den en él las condiciones necesarias para que aparezca la vida, como parece que fue el caso de nuestro planeta, se encuentra que la mínima masa que puede tener una estrella para que junto a ella haya planetas habitables es del orden de 0,6 veces la masa del Sol. Para una estrella de esa masa en sus etapas más jóvenes, la zona de habitabilidad está entre 0,25 y 0,36 veces la distancia de la Tierra al Sol. Un planeta que esté situado justo en el borde exterior de la zona de habitabilidad permanecerá en ella durante 50 000 millones de años, ya que esta estrella, al tener solo un 10% de la luminosidad del Sol, tardará unos 70 000 millones de años en agotar su hidrógeno. Sin embargo, tras unos 1 500 millones de años, si el planeta tiene unas características similares a las de la Tierra, quedará en rotación síncrona alrededor de su estrella, con lo que muy probablemente se hará inhabitable. Las estrellas de menor masa tienen zonas de habitabilidad mucho más próximas, así que un planeta en órbita a ellas queda en rotación síncrona en menos de los mil millones de años que estamos to-

PLANETAS SIN NOCHE

La duración del día en un planeta resulta de la combinación de su movimiento de rotación sobre su propio eje y de su movimiento orbital en torno a su estrella. Si queremos considerar la relación entre la rotación y la traslación de un planeta en su órbita y el movimiento del «sol» sobre el horizonte en el hemisferio norte, contemplaremos los casos de un planeta que no tiene rotación sobre sí mismo y de un planeta que sí gira sobre sí mismo. Para el planeta sin rotación, el sol sale por el oeste y se pone por el este. La duración del día T_d es igual al periodo orbital del planeta T_0 , es decir, a lo que dura un año del planeta. Si transcurrido un intervalo de tiempo Δt el planeta recorre un ángulo θ en su órbita, su sol se mueve un ángulo igual en el cielo. Como una vuelta completa de la órbita son 2π radianes, una regla de tres nos dice que:

$$\theta = 2\pi \frac{\Delta t}{T_0}$$

Duración del día para un planeta en rotación

Para un planeta con rotación, el ángulo α por el que se mueve su sol en el cielo es igual al ángulo θ que recorre el planeta en su órbita menos el ángulo δ que este gira sobre sí mismo: $\alpha = \theta - \delta$. Si el periodo de rotación del planeta es T_r , entonces:

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta t}{T_r}$$

Y el ángulo α se corresponde con una fracción de día igual a:

$$\frac{\Delta t}{T_d} = \frac{\alpha}{2\pi} = \frac{\theta - \delta}{2\pi} = \frac{\Delta t}{T_0} - \frac{\Delta t}{T_r}$$

con lo que nos queda que la duración del día T_d vale:

$$\frac{1}{T_d} = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_r} \Rightarrow T_d = T_r \frac{T_0}{T_r - T_0}$$

La Tierra gira sobre su propio eje (T_r) una vez cada 23,93 horas (la duración de un *día sidéreo*) y una vez en torno al Sol cada año, con lo que T_0 vale 8 766 horas. El resultado es que el día terrestre dura $T_d = 24$ horas, donde el signo menos se debe a que, al ser el periodo de rotación menor que el periodo orbital, el Sol se mueve de este a oeste sobre el cielo, al contrario que el sentido del movimiento de la Tierra sobre sí misma. Cuando los periodos de rotación y orbital son parecidos, el día en un planeta se hace muy largo, lo que hace esperar que las temperaturas diurnas sean muy altas y las nocturnas muy bajas. Si la oscilación térmica es muy grande, el planeta puede no ser apto para albergar vida aunque se encuentre en la zona de habitabilidad de su estrella.

mando como ejemplo para que en él se establezcan las condiciones para que exista la vida.

LAS ESTRELLAS MÁS ADECUADAS PARA LA VIDA

En resumen, bajo los supuestos que hemos aceptado, solo las estrellas entre 0,6 y 2 veces la masa del Sol son capaces de albergar planetas en los que aparezca vida. Las de mayor masa agotan su hidrógeno antes de que pueda surgir esta, suponiendo que un planeta de características similares al nuestro tarda unos mil millones de años en hacerse apto para ella. En estrellas de menor masa, un planeta como la Tierra acaba en rotación sincronizada con el movimiento orbital antes de que transcurra ese tiempo.

Veamos ahora cuánto tiempo pueden mantenerse condiciones adecuadas para la vida en un planeta en órbita a una estrella dentro del rango adecuado de masas. La respuesta depende en primer lugar de lo rápido que se aleje la zona de habitabilidad de la estrella, conforme esta envejece y se vuelve más luminescente. En este aspecto, para un planeta es más conveniente orbitar una estrella de menor masa, ya que cuanto menor sea esta más lentamente aumenta su luminosidad y más tiempo permanece el planeta dentro de la zona de habitabilidad. Por otro lado, un planeta debe estar lo suficientemente alejado de su estrella para no acabar en rotación sincronizada y volverse inhabitable. Para las estrellas de menor masa, un planeta puede prevenir la rotación sincronizada y tener un periodo en el que permanece dentro de la zona de habitabilidad si se forma en el exterior de esta y es alcanzado por ella conforme la estrella envejece y la zona se expande hacia regiones más alejadas del cuerpo estelar. Para planetas similares a la Tierra, la distancia más conveniente a su estrella depende de la masa de esta. Para estrellas de masa entre 0,8 y 2 veces la solar, el máximo periodo de habitabilidad se logra si el planeta se forma en el límite exterior de la zona de habitabilidad de su estrella cuando es joven: si esta tiene 0,8 masas solares, el planeta estará en la zona de habitabilidad unos 18 000 millones de años, hasta que su estrella anfitriona se haga dema-

siado caliente para la distancia a la que se encuentra. Aumentar la masa de la estrella implica disminuir el periodo de tiempo que el planeta es habitable, ya que las de mayor masa envejecen más deprisa. Para entre 0,6 y algo menos de 0,8 masas solares, el máximo periodo de habitabilidad del planeta se consigue si se forma fuera del borde exterior de la zona de habitabilidad y es alcanzado por ella conforme su estrella anfitriona se vuelve más luminosa con la edad. Para planetas orbitando estrellas con entre 0,6 y 0,8 masas solares, el máximo tiempo de habitabilidad se reduce al disminuir la masa de la estrella y el periodo de habitabilidad se traslada a las últimas etapas de la existencia de la estrella anfitriona.

EL FIN DE LA VIDA EN EL UNIVERSO

Vivimos en una época del universo en la que todavía la mayoría de las galaxias forman estrellas a buen ritmo, pero ya vimos que ese ritmo irá disminuyendo con el paso del tiempo hasta que dentro de unas cuantas decenas de miles de millones de años ya no queden galaxias en las que eso ocurra. Nuestro Sol, la Tierra y la especie humana ya habrán desaparecido para entonces, pero entre las últimas estrellas que se formen puede que haya algunas que cuenten con las condiciones para que surja la vida. El gas del que se formen estas últimas estrellas jóvenes seguirá estando formado mayoritariamente por hidrógeno y helio, aunque tengan un contenido de elementos más pesados superior al que es normal en la actualidad en nuestra propia galaxia y en aquellas vecinas a la Tierra. La química de la vida en esas últimas estrellas jóvenes seguirá por tanto muy probablemente usando los mismos elementos que la vida en la Tierra: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre. Pero una vez que se formen las últimas estrellas jóvenes, la vida solo podrá resistir en el universo mientras estas sigan teniendo zonas habitables a su alrededor. Como ya comentamos al hablar de la longevidad de las estrellas, una de un décimo de la masa solar tarda unos 4 billones (4 000 000 de millones) de años en agotar todo su hidrógeno, pero estas

estrellas no pueden albergar planetas compatibles con la vida. Una estrella de 0,6 masas solares tarda 70 000 millones de años en agotar su hidrógeno. Esta masa estelar es la menor para una estrella capaz de iluminar planetas con vida, así que podemos tomar su longevidad como el tiempo máximo que podrá mantenerse la vida en el universo una vez que se acabe la formación estelar. Los habitantes de estos últimos planetas podrán seguir disfrutando de noches estrelladas, aunque las estrellas que queden en ese futuro lejano serán mucho menos brillantes que las que vemos ahora. Sin embargo, aunque pudieran viajar por el espacio, no les quedará adónde ir: la galaxia en la que habiten estará formada por residuos estelares y estrellas pequeñas cuyos planetas serán incapaces de albergar vida. Para cuando llegue el ocaso cósmico y se apaguen las últimas estrellas, no habrá ningún organismo vivo que pueda lamentar su pérdida o guardar un recuerdo del universo que entonces se apagará, quizás para siempre.

LECTURAS RECOMENDADAS

ALEMAN, R., *¿Qué hubo antes del Big Bang? Breve historia de la cosmología*, Pamplona (Navarra), Editorial Laetoli, 2014.

BARROW, J.D., *El libro de los universos*, Barcelona, Crítica, 2012.

DARTNELL, L., *Vida en el universo. Una introducción a la astrobiología*, Madrid, Alianza, 2013.

FRANK, A., *El fin del principio. Una nueva historia del tiempo*, Barcelona, Editorial Ariel, 2012.

IMPEY, C., *Cómo acabará todo. De nosotros al universo*, Vilassar de Dalt (Barcelona), Biblioteca Buridán, 2014.

KAKU, M., *Universos paralelos. Los universos alternativos de la ciencia y el futuro del cosmos*, Girona, Ediciones Atalanta, 2015.

—: *Historia de la cosmología. De los mitos al universo inflacionario*, Barcelona, Crítica, 2008.

MARTÍN-TORRES, F.J., y BUENESTADO, J.F., *La vida en el universo (¿Qué sabemos de?)*, Madrid, Los Libros de la Catarata / CSIC, 2013.

OSTRIKER, J.P. y MITTON, S., *El corazón de las tinieblas. Materia y energía oscuras: los misterios del universo invisible*, Barcelona, Ediciones de Pasado y Presente, 2014.

WEINTRAUB, D.A., *La edad del universo*, Barcelona, Crítica, 2012.

ÍNDICE

- anisotropía del fondo cósmico de microondas 17
- antimateria 125
- antipartícula 106, 110, 125
- antiquark 110-112
- astrobiología 143

- barión 37
- Big Bang 19, 60, 133-135
- Big Crunch 133-135
- bulbo galáctico 47, 50

- cadena protón-protón 77, 80
- campo de Higgs 138, 139
- candela estándar 120
- cefeida 71
- cero absoluto 9, 96, 126
- ciclo del CNO 78-80
- constante
 - cosmológica 12
 - de Boltzmann 82

- de Hubble 18, 20, 22, 30, 34, 42, 43, 120, 121, 130
- coordenadas comóviles 22
- cúmulo de galaxias 33, 35-37, 39-41, 51, 52, 115, 117, 130, 131

- decaimiento
 - del protón 96, 108, 111-114
 - del vacío 139, 140
- densidad crítica 12, 132, 133, 136
- desplazamiento al rojo 27-32, 34, 36, 42, 60, 119-121
- disco galáctico 49, 50, 52, 55-57, 150
- distancia
 - comóvil 22, 26
 - propia 22
- dualidad onda-partícula 106

- efecto túnel 79, 84

energía
 cinética 9, 10, 75, 79, 82, 84,
 102
 del vacío 138-140
 oscura 13, 17, 37, 42-44, 124,
 125, 128-133, 136, 138
 potencial gravitatoria 9, 10,
 102, 103
equilibrio térmico 148
espectro
 electromagnético 27, 62, 154
 galáctico 28, 29, 32
evaporación de agujeros negros
 96, 104, 105, 107, 114, 125
factor de escala del universo 22,
 26, 131
fotón 34, 37, 41, 44, 77, 78, 105,
 107, 108, 111-114, 118-120,
 136
fusión nuclear 10, 41, 53-55, 72,
 73, 76-86, 88, 90, 91, 108, 120
galaxia activa 63, 66, 149
gigante roja, estrella 90
gigantes gaseosos, planetas 149
Gran Explosión véase Big Bang
Gran Implosión véase Big Crunch
grupo de galaxias 34, 35
halo galáctico 49, 50, 55, 150
horizonte de sucesos 105-107
interacción
 electromagnética 44, 74
 gravitatoria 43, 44, 102, 136,
 137
 nuclear débil 44, 79, 136
 nuclear fuerte 44, 74, 75, 108,
 136
isótopo 74, 76, 77, 82
leptón 108, 110, 111
ley de Hubble 18-20, 22, 24, 26,
 29-31, 42, 43, 120, 121, 130
líneas de absorción 28, 29
luminosidad intrínseca 42
magnitud
 absoluta 42
 aparente 42
materia
 bariónica 37, 118, 119
 degenerada 89
 oscura 12, 13, 17, 37, 40-44, 47,
 50, 52, 59, 118, 119, 121, 122,
 124, 125, 128, 129, 133, 136
medio intergaláctico 45, 58, 59
mesón 111, 112
metagalaxia 27
metalicidad 54-56, 58, 86, 150
neutrino 44, 77-79, 108
nube
 azul 87
 molecular 48, 49, 56
núcleo galáctico activo 63, 65,
 150
ondas gravitatorias 44, 97, 100-
 103
partículas virtuales 105-107, 125,
 136, 138
positrón 77-79, 105-107, 110-112,
 114
principio
 de exclusión 88, 89
 de indeterminación 105, 137,
 138

quark 88, 105, 108, 110, 111, 113, 137
down 108, 112
up 108, 112
quásar 66
radiación gravitatoria 96, 103, 108
radio
de Hubble 19-21, 23, 24, 27, 34, 130
de Schwarzschild 104, 105
del horizonte 18, 19
regiones
H I 48, 49
H II 48, 49
relatividad
especial 11, 24, 26
general 11-13, 24, 96, 103, 122, 126
secuencia roja 87
semivida 113
silicona 145
sistema de referencia 21, 24, 26
supernova 25, 42, 61, 89, 90, 95, 155
Ia 42, 43, 120, 121, 123
tasa de formación estelar 56-60, 63, 87, 151
universo
abierto 132, 133, 136, 137
cerrado 132, 133, 136, 137
hiperbólico 133, 136, 137
observable 21, 27, 36, 110, 117
plano 133, 136, 137
velocidad de escape 40, 104
zona de habitabilidad estelar 152-156, 158-161

El final del universo

Todo cambia y nada permanece, quizá ni siquiera el universo en el que vivimos. Pero ¿en qué consisten los cambios que están teniendo lugar en el universo y a qué velocidad se producen? ¿Por cuánto tiempo se parecerá el universo futuro al que conocemos ahora, en el que abundan las estrellas y las galaxias? ¿Durante cuánto tiempo más podrá albergar vida? ¿Tendrá un final y, en ese caso, cómo será? Aunque las respuestas a estas cuestiones siguen siendo temas de investigación en astronomía, en el último siglo se ha averiguado mucho sobre ellas: este libro presenta al lector los conocimientos más actuales sobre dichas materias.

Miguel Ángel Sánchez Quintanilla es profesor titular de Electromagnetismo en la Universidad de Sevilla.